



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ A R A G O N ”

“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO
DE SISTEMA DIGITAL PARA
PROTECCION DE DISTANCIA DE
LINEAS DE TRANSMISION”

T E S I S
Que para obtener el Título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a :
ALEJANDRO VARGAS TREJO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo a :

Mi Padre **Juan Vargas**, por su inmenso amor, cariño, esfuerzo y apoyo tan grande que me brindó y que hizo posible mi formación y la llegada de este momento.

Mi Madre **María Luisa Trejo**, por su cariño y gran amor que me dió a cada instante.

Mi Futura Esposa **Gina Nolasco**, por su apoyo, paciencia, comprensión, cariño y sobre todo amor que me brindó a cada momento que pasamos juntos.

Mi Hermano **Mauricio Vargas y Familia**, por su apoyo y cariño recibido siempre.

A mis Tíos *Jesús Ariza, Aurora Vargas e Hijos*, por su apoyo y cariño incondicional que me ofrecieron.

A la *Familia Nolasco*, por su cariño, amor y amistad que me brindaron durante mis estudios y desarrollo de esta tesis.

A mi Abuelita *Victoria Melo*, por sus sabios consejos y su gran amor brindado.

A la *Familia Marín*, por su apoyo y cariño que me brindaron.

A mis Amigos: *Américo, Víctor, Rodrigo, Raymundo, Fernando, Alberto, Gerardo, Rafael, Felipe, Manuel, Edward, Jesús y Zenón* por su gran amistad y su cariño que me brindaron durante mis estudios y desarrollo de este trabajo.

Y sobretodo a ti *Dios* por todo lo que me brindaste y me ofreciste siempre, y por tu inmenso **Amor** inigualable.

AGRADECIMIENTOS

Al *M. en I. Eduardo Estrada García*, por todo su apoyo, amistad, dirección, tiempo dedicado y sus valiosos comentarios brindados durante el desarrollo del presente trabajo.

Al *Ing. Juan Méndez Moreno*, por su contribución y apoyo en esta etapa de mi formación académica y por sus valiosos comentarios y tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al *Instituto de Investigaciones Eléctricas* por el apoyo en recursos materiales, humanos y económicos brindados durante la realización de este trabajo.

Y al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* por el apoyo económico brindado durante la realización de este trabajo.

INDICE

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

CAPITULO 1. INTRODUCCION.	1
<hr/>	
CAPITULO 2. PROTECCION DIGITAL DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.	5
<hr/>	
2.1 La Filosofía de la Protección en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	5
2.2 Análisis de Fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	6
2.3 Protección por Relevadores.	7
2.3.1 Principios de Funcionamiento de los Relevadores.	10
2.3.2 Características Funcionales de la Protección por Relevadores.	11
2.4 Protección por Relevadores de Distancia.	13
2.5 Protección por Relevadores de Sobrecorriente.	19
2.6 Protección Tipo Piloto o Telemando.	21
2.7 Arquitectura de un Relevador Digital.	23
2.8 Ventajas y Limitaciones de los Relevadores y Sistemas Digitales de Protección.	27
2.9 Protección Digital de Líneas de Transmisión.	29

2.10	Protección Digital de Transformadores, Buses y Generadores.	30
------	---	----

CAPITULO 3. ALGORITMOS DE PROTECCION DE LINEA POR CALCULO DE IMPEDANCIA.		33
---	--	-----------

3.1	Consideraciones sobre los Algoritmos de Protección Digital.	33
3.2	Algoritmo de Filtrado Digital.	34
3.3	Algoritmo de Ecuación Diferencial.	35
3.4	Algoritmo de Análisis de Fourier.	38
3.5	Algoritmo de Análisis de Walsh.	40
3.6	Algoritmo de Disparo.	43

CAPITULO 4. CONSIDERACIONES DE HARDWARE PARA UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE PROTECCION DE DISTANCIA.		44
---	--	-----------

4.1	Introducción.	44
4.2	Módulo de Generación de Transitorios.	48
4.2.1	Arquitectura de la Tarjeta.	49
4.3	Módulo de Adquisición de Datos.	50
4.3.1	Arquitectura de la Tarjeta.	50
4.4	Módulo de Cálculo y de Resultados.	62

CAPITULO 5. CONSIDERACIONES DE SOFTWARE PARA UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE PROTECCION DE DISTANCIA.		63
---	--	-----------

5.1	Introducción.	63
5.2	Modo de Acceso Directo a Memoria (ADM).	63

5.2.1	Uso del ADM con BASIC.	64
5.2.2	Parámetros del ADM.	65
5.3	Registros de la Tarjeta.	66
5.4	Instrucciones de la Tarjeta.	67
5.5	Descripción General del Programa de Generación de Transitorios.	69
5.6	Descripción General del Programa de Adquisición, de Cálculo y de Resultados.	70
CAPITULO 6. PRUEBAS AL PROTOTIPO.		77
6.1	Sistema de Potencia Empleado.	77
6.2	Característica de Operación.	79
6.3	Pruebas Realizadas.	80
6.4	Resultados Obtenidos.	109
6.5	Fuentes de Error.	111
CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		113
7.1	Conclusiones Generales.	113
7.2	Recomendaciones.	114
7.3	Perspectivas de Uso Futuro.	115
APENDICE A. TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS DT2801-A.		116
A1.	Subsistema Analógico / Digital.	116
A2.	Subsistema Digital / Analógico.	118
A3.	Disparo.	119

A4. Reloj Interno.	119
A5. Características de la Interface.	120
A6. Requerimientos de Energía.	120
A7. Entorno Físico de la Tarjeta.	120

APENDICE B. TABLILLA DE CONEXIONES DT707.	121
--	------------

B1. Especificaciones Generales.	121
B2. Diagrama de Conexiones.	122

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	123
------------------------------------	------------

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

NUMERO DE FIGURA O TABLA	DESCRIPCION
CAPITULO 2	
Figura 2.1	Protección Primaria de un Sistema de Potencia.
Figura 2.2	Característica de Protección Mho (Circular).
Figura 2.3	Característica de Protección Poligonal (Cuadrilátero).
Figura 2.4	Conceptos de la Protección de Distancia.
Figura 2.5	Ajuste de la Segunda Zona de Protección.
Figura 2.6	Ajuste de la Tercera Zona de Protección.
Figura 2.7	Curvas Tiempo-Corriente de un Relevador de Sobrecorriente.
Figura 2.8	Diagrama de Bloques de un Relevador Digital.
Figura 2.9	Alternativas de Muestreo y Conversión A/D en un Relevador.
Tabla II.1	Señales "Delta" para Relevadores de Fase.
Tabla II.2	Señales "Compensadas" para Relevadores de Tierra.
CAPITULO 3	
Figura 3.1	Modelo RL Simple de una Línea de Transmisión.
Figura 3.2	Muestreo de una Señal.
Figura 3.3	Primeras 16 Funciones de Walsh.
CAPITULO 4	
Figura 4.1	Sistema de Multiproceso.

**NUMERO DE FIGURA
O TABLA****DESCRIPCION**

Figura 4.2	Generador de Señales de Falla Desarrollado por Jeyasurya.
Figura 4.3	"Hardware" Empleado en el Prototipo de Relevador Digital Desarrollado por Jeyasurya.
Figura 4.4	Módulos del Simulador de Protección Dígital.
Figura 4.5	Convertidor Digital / Analógico de 12 bits.
Figura 4.6	Arquitectura de la Tarjeta de Adquisición de Datos.
Figura 4.7	Diagrama de Bloques de un Multiplexor.
Figura 4.8	Recepción de Tipo Secuencial.
Figura 4.9	Señal Analógica Continua.
Figura 4.10	Señal Discreta.
Figura 4.11	Circuito de Muestreo y Retención.
Figura 4.12	Convertidor Analógico / Digital Típico.
Figura 4.13	Arquitectura General de un Microprocesador.
Figura 4.14	Sistema con Disparo Externo.
Figura 4.15	Circuito Seguidor.
Tabla IV.1	Ganancia del Amplificador.

CAPITULO 5

Figura 5.1	Funciones de los Bits en el Registro de Instrucciones.
Figura 5.2	Diagrama de Bloques del Programa GTFA de Generación de Transitorios.
Figura 5.3	Diagrama de Bloques del Programa ADFa de Protección.

CAPITULO 6

Figura 6.1	Sistema de Potencia Seleccionado.
Figura 6.2	Localización del Relevador Z, Alcance de las Zonas 1 y 2 en la Línea de Transmisión Seleccionada.

**NUMERO DE FIGURA
O TABLA**

DESCRIPCION

Figura 6.3	Señales de Corriente de una Falla Trifásica Suministradas al Prototipo.
Figura 6.4	Señales de Voltaje de una Falla Trifásica Suministradas al Prototipo.
Figura 6.5	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase A; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.
Figura 6.6	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase B; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.
Figura 6.7	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase C; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.
Figura 6.8	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial con Muestreo Secuencial.
Figura 6.9	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Fourier con Muestreo Secuencial.
Figura 6.10	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Walsh con Muestreo Secuencial.
Figura 6.11	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase A; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.

**NUMERO DE FIGURA
O TABLA**

DESCRIPCION

Figura 6.12	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase B; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.
Figura 6.13	Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase C; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.
Figura 6.14	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial con Muestreo Simultáneo.
Figura 6.15	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Fourier con Muestreo Simultáneo.
Figura 6.16	Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Walsh con Muestreo Simultáneo.
Figura 6.17	Error de Monotonicidad.
Tabla VI.1	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial y Muestreo Secuencial.
Tabla VI.2	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Fourier y Muestreo Secuencial.
Tabla VI.3	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Walsh y Muestreo Secuencial.
Tabla VI.4	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial y Muestreo Simultáneo.
Tabla VI.5	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Fourier y Muestreo Simultáneo.
Tabla VI.6	Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Walsh y Muestreo Simultáneo.

INTRODUCCION

En el campo de la protección de sistemas eléctricos de potencia se han registrado grandes avances en las últimas dos décadas, sobre todo en lo referente a la tecnología de los relevadores de protección y su equipo asociado (transductores primarios de corriente y potencial y canales de comunicación).

Las investigaciones referentes a la protección de sistemas eléctricos pueden subdividirse en dos grandes grupos: los estudios sobre el sistema a proteger y sus elementos en lo referente a su comportamiento en condiciones anormales de operación; y el desarrollo de nuevos principios, sistemas y equipos de protección, y métodos para su diseño y análisis de operación.

La complejidad del sistema eléctrico de potencia como objeto de protección se ha incrementado considerablemente en los últimos años en los distintos países; ejemplos de ello son el aumento de la capacidad de las unidades de generación en relación con la de todo el sistema, la creciente necesidad de transmitir grandes bloques de potencia a través de líneas largas, y el incremento de las restricciones de todo tipo a la construcción de nuevas líneas, disminuyendo cada vez más la redundancia de la red de transmisión. Todo esto hace que el sistema deba operar en condiciones cercanas a las críticas, e impone a su protección requerimientos muy exigentes en cuanto a velocidad, sensibilidad, selectividad y confiabilidad.

Actualmente muchos especialistas en protección realizan la tarea de coordinar y ajustar las protecciones de distancia manualmente; esto implica manejar una gran cantidad de información (resultados de estudios de fallas, parámetros de las líneas, etc.), así como realizar muchos cálculos para determinar los ajustes que permitan obtener la coordinación apropiada. Este trabajo resulta extremadamente laborioso. Además, el ajuste de los relevadores de distancia en líneas de transmisión de sistemas muy anillados o donde la diferencia de longitud entre líneas adyacentes es muy grande, dificulta determinar el ajuste de las zonas de protección porque se puede incurrir en subalcances o sobrealcances.

El desarrollo de nuevos principios, sistemas y equipos de protección ha estado favorecido por los avances de la electrónica disponible. La aplicación de los dispositivos electrónicos de mediano nivel de integración, que en la década de 1960-70 representó un impulso considerable al desarrollo de los relevadores estáticos de protección, quedó relegada a un segundo plano con el surgimiento del microprocesador y su utilización para realizar funciones de protección. A ello se suman en la actualidad las posibilidades que brinda la optoelectrónica para el desarrollo de canales de comunicación de gran capacidad con buen aislamiento eléctrico e inmunidad a las interferencias electromagnéticas.

La aplicación de las técnicas de computación ha constituido un factor importante en el desarrollo del área de las protecciones. Los primeros trabajos de investigación sobre la utilización de las computadoras digitales para realizar funciones de protección se iniciaron hace algo más de 20 años. El alto costo, la insuficiente velocidad y el elevado consumo de potencia de las computadoras disponibles en esa época constituyeron un freno a la aplicación práctica de los algoritmos y sistemas desarrollados, pero el surgimiento del microprocesador hizo reducir el costo y aumentar las potencialidades de las computadoras digitales, y marcó, por tanto, el inicio del desarrollo acelerado de la protección digital de sistemas eléctricos de potencia. La computación digital se ha utilizado como medio de cálculo para el análisis del comportamiento del sistema eléctrico y sus elementos durante cortocircuitos y otros regímenes anormales, como base para la determinación de los parámetros de operación de las protecciones. La simulación digital de los relevadores de protección y de los transductores primarios de corriente y voltaje ha sido otra aplicación importante de la computación en este campo. La computadora digital ha sido también una valiosa herramienta para el diseño de relevadores estáticos y esquemas completos de protección.

La mayoría de la literatura reciente referente a la protección digital de líneas de transmisión, está dedicada al empleo de microcomputadoras para realizar tareas de protección, control, supervisión, switcheo, monitoreo y funciones de almacenamiento de los datos de las líneas de transmisión desarrollados por algoritmos adecuados.

Algunos nuevos desarrollos en el área del diseño de relevadores digitales de protección y simulación de transitorios de falla, han sido planteados para desarrollar prototipos o sistemas de laboratorio.

En el área de diseño de prototipos de laboratorio, existen algunos que basan su diseño empleando una configuración de multiprocesador, en donde las tareas de filtrado de los transitorios y el cálculo de la impedancia aparente vista por el relevador, se realizan con dos procesadores, independientes y en paralelo. Para la generación de los transitorios de falla se emplean circuitos de generación de señales y las muestras de voltaje y corriente obtenidas se almacenan en memorias programables de solo lectura borrables electrónicamente (EEPROM). Existen otros prototipos que tienen una gran variedad de técnicas actualizadas para la protección, no solamente sensando la falla y mandando la señal de disparo para la apertura de interruptores, sino analiza el problema, calculando la distancia a la falla y almacenando los datos para un análisis posterior.

Referente a la simulación de transitorios, algunos simuladores digitales emplean la computadora para realizar la simulación completa del sistema de potencia requerido y generar los transitorios en tiempo real para la evaluación del relevador. Existen otros simuladores que proporcionan una reproducción exacta del comportamiento de un sistema de transmisión bajo condiciones de transitorios originados por cortocircuitos u operaciones de switcheo.

Recientemente, se desarrolló un simulador digital de tiempo real, que emplea una arquitectura de procesamiento en paralelo basado en los procesadores de señales digitales (DSP) para llevar a cabo simulaciones en tiempo real dentro de un intervalo comprendido de 50 a 100 μ seg. Los dispositivos físicos como relevadores y estabilizadores del sistema de potencia se alimentan con las señales del simulador y la salida de los mismos se retroalimentan al sistema. Su flexibilidad y fácil empleo, los hacen una herramienta valiosa para pruebas en una gran variedad de sistemas de protección. Su extensa capacidad para simular fenómenos muy complejos, facilitan el estudio y el desarrollo de nuevos relevadores de protección.

En México, como en muchos otros países, la adopción de la tecnología de protección es muy reciente. Por lo que se ha hecho imperante para el sector eléctrico el desarrollo eficaz y oportuno, tanto de recursos humanos capacitados en el área como de las herramientas de análisis y diseño requeridas.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un prototipo de un relevador digital de cálculo de impedancia y localización de fallas para protección de líneas de transmisión a base de computadoras personales con procesadores

Intel 386. Se seleccionará el "hardware" de adquisición de datos, así como el "software" necesario para el desarrollo del mismo.

CONTENIDO DE LA TESIS

La tesis está dividida en siete capítulos.

El capítulo 1 da una reseña histórica referente a la protección en los sistemas eléctricos de potencia.

El capítulo 2 presenta un análisis de las fallas, los tres principales esquemas de protección, así como lo referente a la protección digital en los sistemas eléctricos de potencia.

El capítulo 3 presenta algunos algoritmos empleados en la protección de distancia.

El capítulo 4 detalla el "hardware" que se empleó para el prototipo de sistema digital.

El capítulo 5 presenta el "software" empleado para el desarrollo del prototipo de sistema digital.

El capítulo 6 muestra algunas pruebas a las que se sometió el prototipo de sistema digital.

El capítulo 7 da las conclusiones de la tesis, las recomendaciones pertinentes y los trabajos futuros propuestos.

**PROTECCION DIGITAL DE SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA**

**2.1 LA FILOSOFIA DE LA PROTECCION EN SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA.**

En el diseño de un sistema eléctrico ya sea con propósitos de generación, transmisión, distribución o utilización se deben considerar básicamente tres aspectos:

- El primero y que resulta ser el más común es su operación normal, lo que significa que no debe haber interrupción en el servicio ocasionados por cortocircuitos o circuitos abiertos en el sistema.
- El segundo aspecto se refiere a la prevención de fallas, es decir los sistemas deben diseñarse para que técnica y económicamente se obtenga una solución óptima entre economía y confiabilidad para la prevención de fallas.
- El tercer aspecto es la reducción de los efectos de las fallas cuando se presentan éstas a pesar de las prevenciones. En este caso se deben considerar los elementos de protección adecuados para minimizar el número de circuitos que salgan de servicio en caso de falla, procurando afectar siempre al menor número de usuarios.

Al respecto existen ciertos requerimientos mínimos que se deben cumplir en el suministro de potencia eléctrica, el primer requerimiento es disponer de un medio adecuado para la transmisión de potencia a la carga, con un tamaño de conductor económico y el nivel de aislamiento apropiado. Es esencial que las características de la carga se conozcan en cierto grado.

Los sistemas radiales son los menos confiables dado que una falla permanente sobre un ramal altera la alimentación a las cargas en forma considerable. Los sistemas mallados son más confiables dado que las cargas se pueden alimentar con dos o más alimentadores. Las redes de alta confiabilidad son más costosas ya que cada carga se alimenta por varios circuitos.

2.2 ANALISIS DE FALLAS EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia debe asegurar que toda carga conectada al mismo disponga de energía sin interrupción alguna. Cuando dicho suministro se extiende a poblaciones distantes, el sistema cuenta con varios miles de kilómetros de líneas de distribución. Las líneas de transmisión de alta tensión que alimentan grandes cargas pueden extenderse hasta por varios centenares de kilómetros. Debido a que por lo general todas estas líneas son aéreas o elevadas y están expuestas a la intemperie, existe la probabilidad de que se interrumpan por causas tales como: tormentas, caída de objetos externos, daño a los aisladores, etc. Una de las principales causas de interrupción del suministro continuo es la falla en derivación o cortocircuito; ésta ocasionará un cambio súbito y a veces violento en la operación del sistema.

Los relevadores de protección y los sistemas de relevadores detectan condiciones anormales en los circuitos eléctricos, aislando en forma automática y con rapidez, el elemento con falla. Esto limita el daño al lugar en el que se localiza la falla e impide que sus efectos se propaguen al sistema.

NATURALEZA Y CAUSAS DE LAS FALLAS.

Una falla es simplemente una condición anormal que ocasiona una reducción de la resistencia del aislamiento básico ya sea entre los conductores de las fases, entre los conductores de las fases y tierra o entre cualquiera de las mallas a tierra que rodeen a los conductores. La reducción del aislamiento no se considera como falla, hasta que produce algún efecto en el sistema, es decir, hasta que provoca un exceso de corriente o reduce la impedancia entre los conductores o entre los conductores y tierra, llevándolas a un valor inferior al de la impedancia de carga mínima normal para el circuito. Es inevitable que ocurra una falla en una red tan grande como lo es un sistema de potencia constituido por generadores, interruptores, transformadores y circuitos de transmisión y distribución.

Las fallas se pueden agrupar de la siguiente manera:

- a) Fallas debidas a defectos y envejecimientos. La interrupción puede ocurrir con voltaje normal a causa del deterioro del aislamiento y el daño debido a hechos impredecibles, tales como: el que se poseen los

pájaros sobre las líneas, cortocircuitos accidentales ocasionados por ramas de árboles, cuerdas de cometas, etc.

- b) Fallas debidas a sobrecargas. La interrupción puede ocurrir por voltajes anormales, ya que el aislamiento sólo puede soportar el voltaje nominal. Esto sucede ya sea por variaciones ocasionadas por interruptores o por rayos.

CONSECUENCIAS DE LAS FALLAS.

El fuego es una de las consecuencias más graves de una gran falla no liberada, ésta puede dañar la parte en que se originó, así como extenderse al sistema y ocasionar su destrucción total. El tipo de falla más común y peligroso es el cortocircuito dando origen a cualquiera de las siguientes anomalías:

1. Una reducción en el voltaje de la línea en una parte importante del sistema. Esto puede originar la interrupción del suministro eléctrico y ocasionar pérdidas en la producción.
2. Daños a los elementos eléctricos del sistema.
3. Daños a otros aparatos del sistema debidos a sobrecalentamiento y a fuerzas mecánicas anormales.
4. Perturbaciones en la estabilidad del sistema eléctrico, que incluso puede ocasionar un paro completo del sistema de potencia.
5. Marcada reducción en el voltaje, originando fallas en las bobinas de presión de relevadores de protección.
6. Considerable reducción en el voltaje de los alimentadores en buen estado conectados al sistema con falla.

2.3 PROTECCION POR RELEVADORES.

La función principal de la protección por relevadores es la de detectar fallas y retirar rápidamente del servicio cualquier elemento de un sistema de potencia. El equipo de protección esta respaldado por interruptores capaces de desconectar el elemento fallado cuando el equipo de protección se lo manda.

Los interruptores están localizados de tal manera que cada generador, transformador, barra colectora, línea de transmisión, etc., pueda desconectarse por completo del resto del sistema. Estos interruptores deben tener la capacidad suficiente para conducir momentáneamente e interrumpir la corriente máxima de cortocircuito que pueda fluir a través de ellos. Deben soportar también el cierre de un cortocircuito semejante e interrumpirlo de acuerdo con ciertas normas prescritas. Los fusibles se emplean donde los relevadores de protección y los interruptores no son justificables económicamente.

Una función secundaria de la protección por relevadores es indicar el sitio y el tipo de falla. Estos datos no solo ayudan en la reparación oportuna sino que también proporcionan medios para el análisis para la prevención de la falla.

La protección de los sistemas de transmisión está formada por una protección primaria y protecciones de respaldo. La protección primaria debe ser de alta velocidad y aislar la mínima sección de la red ante la falla. Las protecciones de respaldo son de acción retardada (con un tiempo suficiente para permitir que opere la primaria), es decir, debe operar sólo si falla la protección primaria. Las protecciones deben estar dispuestas de tal manera que una falla en la protección primaria no origine una falla en la protección de respaldo.

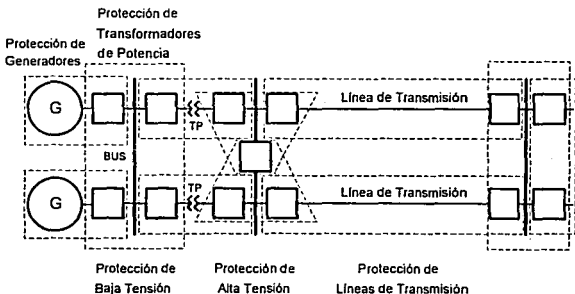


Fig. 2.1 Protección Primaria de un Sistema de Potencia.

RELEVADORES DE FASE Y TIERRA.

En un sistema de transmisión pueden ocurrir dos tipos de fallas: a tierra y entre fases. La protección de cada falla se realiza a través de unidades o elementos de tierra y de fase respectivamente, ajustándose para un alcance predeterminado.

Las señales de falla que deben entrar en un relevador dependen precisamente del relevador en estudio. Para los relevadores de fase, se emplean los voltajes y las corrientes "delta"; mientras que los relevadores de tierra emplean voltajes de fase a neutro y corrientes "compensadas" de fase, como se muestra en las tablas siguientes :

Fases	Voltajes	Corrientes
A - B	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$
B - C	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$
C - A	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$

Tabla II.1 Señales "Delta" para Relevadores de Fase.

Fases	Voltajes	Corrientes
A	V_A	$I_A + K I_0$
B	V_B	$I_B + K I_0$
C	V_C	$I_C + K I_0$

Tabla II.2 Señales "Compensadas" para Relevadores de Tierra.

donde:

$$K = \operatorname{Re} [(Z_0 - Z_1) / 3Z_1]$$

Z_0 = Impedancia de la línea de secuencia cero.

Z_1 = Impedancia de la línea de secuencia positiva.

I_0 = Corriente en el neutro.

Para una falla trifásica se aplica cualquiera de las expresiones anteriores.

2.3.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS RELEVADORES.

Todos los relevadores utilizados para protección de cortocircuitos funcionan en virtud de la corriente y/o tensión recibidas por los transformadores de corriente y tensión conectados en diversas combinaciones. Por cambios individuales o relativos en estas dos magnitudes, las fallas señalan su presencia, tipo, y localización. Para cada tipo y localización de falla, hay alguna diferencia característica en estas magnitudes.

Las diferencias en cada magnitud son posibles en una o más de las que a continuación se dan:

- Magnitud.
- Frecuencia.
- Angulo de fase.
- Duración.
- Razón de cambio.
- Dirección u orden de cambio.
- Armónicas o formas de onda.

Los relevadores que se utilizan para sistemas de protección se fabrican sobre una o varias unidades de decisión o detectores de falla, junto con su lógica necesaria y unidades auxiliares. De acuerdo a su principio de funcionamiento existen tres categorías básicas :

Relevadores Electromagnéticos.

Dentro de esta categoría existen dos tipos que son los más usados: los de atracción magnética, estos funcionan con la acción de un émbolo que es atraído dentro de un solenoide o por la atracción de una armadura originada por los polos de un electroimán, y los de inducción magnética que utilizan el principio del motor de inducción, desarrollando el par mecánico mediante inducción en un rotor.

Relevadores de Estado Sólido.

Los relevadores de estado sólido o estáticos [1] surgieron a partir de las nuevas necesidades de protección originadas por la complejidad creciente de los sistemas eléctricos de potencia. Mientras tanto, los relevadores electromagnéticos tienden a ser más robustos, complejos mecánicamente y de mayor costo, por lo que es necesario reemplazarlos por relevadores de estado sólido que han mejorado su confiabilidad, reduciendo tiempos de operación repercutiendo en la estabilidad del sistema.

Relevadores Microprocesados.

La protección por microprocesador funciona en forma similar a la protección analógica, es decir, acepta voltajes y corrientes y otros datos de fuentes analógicas y de circuitos de control por medio del cierre de contactos o el switcheo de interruptores de estado sólido (ver sección 2.7).

2.3.2 CARACTERISTICAS FUNCIONALES DE LA PROTECCION POR RELEVADORES

Los términos más comunes empleados para describir las características funcionales de cualquier equipo de protección por relevadores son: confiabilidad, selectividad y rapidez de operación. Todos estos están incluidos en las consideraciones de protección primaria y de respaldo.

CONFIABILIDAD

La confiabilidad requerida para el conjunto sistema de protección – sistema eléctrico es el primer aspecto a considerar en la definición del sistema de protección.

Durante la etapa de la planificación del sistema o de la instalación eléctrica particular, se establece la confiabilidad buscada en su conjunto y en función de ésta se determina un grupo de requisitos que deben satisfacer los relevadores de protección.

También debe tomarse en cuenta la probabilidad de que el sistema de protección no opere ante una falla en el sistema eléctrico y también la de una operación incorrecta que provoque una desconexión incorrecta.

Cuando la protección por relevadores no funciona adecuadamente, las características de reducción implicadas son poco efectivas. Por lo tanto, es esencial que el equipo de protección por relevadores sea muy confiable y que su aplicación, instalación y mantenimiento aseguren que su aprovechamiento sea el máximo.

SELECTIVIDAD

Esta es la propiedad que debe tener el equipo para aislar sólo el elemento del sistema que se encuentra en condición de falla, quedando intactas las secciones restantes en buen estado. La selectividad es absoluta si la protección responde sólo a las fallas que ocurren dentro de su propia zona, y relativa si se gradúan los ajustes de las protecciones de las diversas zonas para que puedan responder a una falla dada.

Los sistemas de protección con selectividad absoluta, se conocen como sistemas unitarios y los sistemas con selectividad relativa, como sistemas no unitarios.

RAPIDEZ DE OPERACION

La rapidez de operación de los relevadores de protección se determina normalmente a base de estudio de estabilidad.

Se requiere que los relevadores de protección sean de acción rápida, por las siguientes razones:

- a) No debe rebasarse el tiempo crítico de desconexión.
- b) Los equipos o aparatos eléctricos pueden dañarse si soportan corrientes de falla durante un tiempo prolongado.
- c) Una falla persistente puede reducir el voltaje y ocasionar un flujo de potencia lento con la consiguiente sobrecarga en las transmisiones industriales.

Mientras más breve sea el tiempo en que persista la falla, se podrá transmitir más potencia, sin que haya pérdida de sincronismo.

2.4 PROTECCION POR RELEVADORES DE DISTANCIA.

Debido al constante desarrollo de los sistemas eléctricos de potencia, se han creado nuevos dispositivos para cubrir necesidades de protección; estos deben contar con mayor selectividad y rapidez de operación para liberar las fallas. Para la protección de los sistemas de transmisión se utilizan los relevadores de distancia que superan las deficiencias de los relevadores de sobrecorriente, entre las cuales están : su utilización limitada a sistemas pequeños, el reajuste para cambios en la carga o la generación y su mayor dificultad de ajuste y coordinación.

El uso más generalizado para este tipo de relevadores es en la protección primaria y la de respaldo para fallas de fase en líneas de transmisión, y su tendencia es sustituir a los relevadores de sobrecorriente en la protección de fallas a tierra.

En general, los relevadores de distancia hacen sus mediciones en términos de la razón entre el voltaje y la corriente que reciben. El valor de impedancia obtenido puede localizarse en un diagrama resistencia-reactancia (R-X). Los relevadores convencionales normalmente emplean círculos para sus características de protección como por ejemplo, los del tipo mho. Actualmente, la tendencia es la de emplear zonas de protección poligonales en los relevadores digitales. Esto reduce los requerimientos computacionales, además de que representan las zonas de protección de una manera más real.

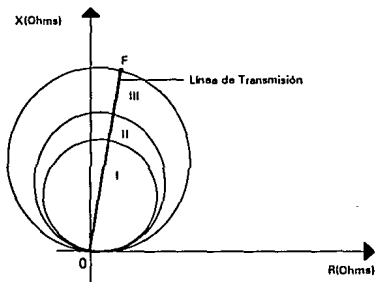


Fig. 2.2 Característica de Protección Mho (Circular).

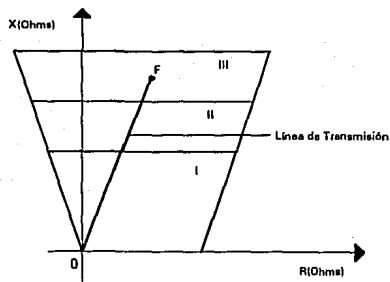


Fig. 2.3 Característica de Protección Poligonal (Cuadrilátero).

Si la impedancia medida se encuentra dentro de alguna zona de operación, se enviará una señal de disparo de la rama protegida. Es posible lograr que la impedancia medida sea proporcional a la longitud de la sección de línea comprendida desde el punto de ubicación de la protección hasta el punto de falla.

La protección de distancia no es unitaria por lo que además de proteger la zona deseada, cuenta con la posibilidad de proporcionar respaldo a las secciones de líneas cercanas a su zona de protección. Este tipo de relevador no se ve afectado por los cambios en la magnitud de la corriente, debido a que ubica la falla en función de la impedancia entre el relevador y la falla.

Los relevadores de distancia [2] básicamente son de bajo voltaje y se alimentan con corrientes y voltajes de los secundarios de los transformadores de corriente y de potencial, por lo que medirán la impedancia en términos de ohms secundarios. Los ohms secundarios se relacionan con los ohms primarios del sistema mediante la siguiente expresión:

$$Z_{sec} = Z_{pri} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (2.1)$$

donde:

Z_{sec} : Ohms secundarios.

Z_{pri} : Ohms primarios.

RTC : Relación del transformador de corriente.

RTP : Relación del transformador de potencial.

ZONAS DE PROTECCION

La protección de distancia tiene distintos tiempos de operación. La característica más utilizada es la de tiempo escalonado con tres zonas de protección.

PRIMERA ZONA.

La primera zona opera como protección primaria para una falla en la línea protegida. Esta zona debe ajustarse para operación instantánea, de manera que cubra una mayor porción de la línea en la que opera el relevador. Este ajuste varía del 80 al 90 por ciento de la longitud de la línea protegida, pero su alcance no debe extenderse más allá del bus remoto.

Considérese la situación de la figura 2.4a. En condiciones normales de funcionamiento se tiene:

$$Z = 1.0 + 0.3j \quad (2.2)$$

Gráficamente, en el plano Z se localiza el punto A, fig. 2.4b. Considérese ahora una falla controlada con el interruptor de la figura 2.4a. Para una falla en el bus C, se cerrará el interruptor S, por lo que se tendrá :

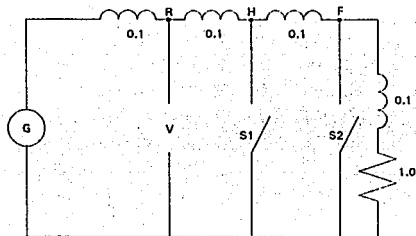
$$Z = 0.2j \quad (2.3)$$

y se obtendrá ahora el punto B. Se sabe que la impedancia de una línea serie es directamente proporcional a la distancia desde el extremo emisor. Por lo tanto, una falla a la mitad de la línea se modelará con M, es decir :

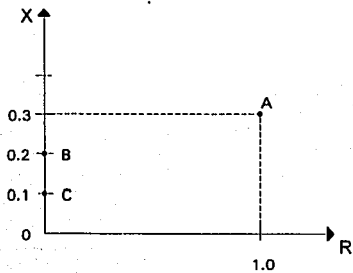
$$Z = 0.1j \quad (2.4)$$

localizada en el punto C de la figura 2.4b. De lo anterior se pueden deducir las siguientes conclusiones :

- En condiciones normales de funcionamiento se está relativamente lejos del origen R-X con una componente R grande.
- Cuando ocurre una falla, el punto A se acerca más al origen.
- Z en condiciones de falla es predominantemente X (100 por ciento en el ejemplo anterior).
- Las fallas producen X positiva, esto es consecuencia de las direcciones positivas de V e I.



a) Red de Secuencia Positiva.



b) Punto de Operación

Fig. 2.4 Conceptos de la Protección de Distancia.

SEGUNDA ZONA.

Esta zona protege también en forma primaria la parte final de la línea protegida, además da protección de respaldo al bus remoto y a una sección pequeña de línea adyacente. Esta protección debe ajustarse de tal manera que sea capaz de funcionar aún en las fallas de arco en el extremo de la línea. Si todavía no se han considerado las fallas de arco, se tendrá que tomar en cuenta una tendencia de subalcance debido al efecto de fuentes de corriente intermedias y los errores en: los datos en los que están basados los ajustes, los transformadores de corriente y potencial y en los relevadores.

Por lo general, se acostumbra ajustar el alcance de la segunda zona a un mínimo del 20 por ciento de la sección de la línea adyacente; cuanto más lejos pueda extenderse ésta en la sección de la línea adyacente, mayor será la desviación permitida en el alcance de la tercera zona de la siguiente sección de línea.

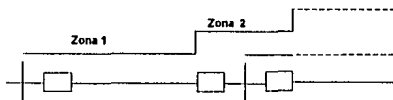


Fig. 2.5 Ajuste de la Segunda Zona de Protección.

TERCERA ZONA.

La tercera zona proporciona protección de respaldo para las fallas en las secciones de líneas adyacentes. Su alcance deberá extenderse tan lejos como sea posible, más allá del extremo de la sección de línea adyacente más larga, en las condiciones que originan la cantidad máxima de sobrealcance, es decir, arcos y fuentes de corrientes intermedias. La figura 2.6 muestra la característica normal de respaldo.

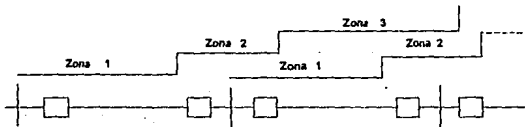


Fig. 2.6 Ajuste de la Tercera Zona de Protección.

Todos los tiempos de operación de primera zona son de alta velocidad, los tiempos de segunda zona son del orden de 0.3 a 0.5 segundos y los de tercera zona de 0.6 a 1.0 segundos.

2.5 PROTECCION POR RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE.

La protección de sobrecorriente responde al valor de la corriente y a la dirección de la potencia de cortocircuito en el punto de ubicación de la falla. Esta protección opera si la corriente sobrepasa el valor de arranque de la protección y la dirección de la potencia coincide con la correspondiente a un cortocircuito en la zona protegida. Se compone de una protección de sobrecorriente con selectividad relativa, complementada con equipo de medición que determina la dirección de la potencia de cortocircuito (relevador direccional). Se cuenta con dos zonas de protección: la primera opera en forma instantánea para fallas en la línea donde está la protección y la segunda opera con retardo de tiempo, su alcance llega hasta el extremo de la línea adyacente. La parte instantánea operará como protección primaria de la propia línea, mientras que la parte con retardo de tiempo operará como respaldo para la barra en el otro extremo de la línea y la línea adyacente.

En general, este tipo de protección se emplea en sistemas de voltajes medios y es factible donde las corrientes de falla son mucho mayores que las corrientes de carga, además este tipo de protección es la más difícil de aplicar en sistemas en anillo o en malla y la que más rápido necesita ajuste o reemplazo a medida que cambia el sistema. Se le utiliza por lo general para

protección contra fallas de fase a tierra o entre fases, en los circuitos de servicios propios de la central y en los circuitos de distribución de servicio eléctrico, en sistemas industriales y en algunas líneas de transmisión donde no puede justificarse el costo de la protección de distancia.

En este tipo de relevadores, se tiene una característica de operación tal, que el tiempo de operación varía en forma inversa con la corriente que circula por el relevador. Esta característica se identifica en forma convencional con una de las cuatro características siguientes : de tiempo definido, de tiempo inverso, de tiempo muy inverso y de tiempo extremadamente inverso. Las curvas correspondientes a cada una de estas clasificaciones difieren por el rango en el cual el tiempo de operación decrece al aumentar el valor de la corriente.

Cada una de estas curvas en el diagrama Tiempo - Corriente, tendría una representación como la que se muestra en la figura 2.7.

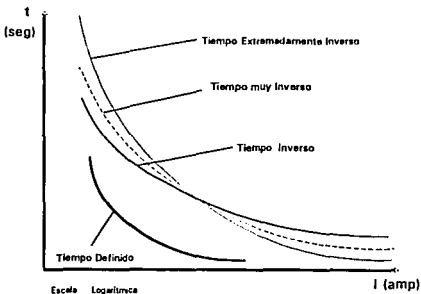


Fig. 2.7 Curvas Tiempo-Corriente de un Relevador de Sobrecorriente.

2.6 PROTECCION TIPO PILOTO O TELEMANDO

El término piloto significa que entre los extremo de la línea de transmisión hay un canal de interconexión de alguna clase por el que puede transmitirse información.

La protección tipo piloto es una protección con selectividad absoluta y basa su funcionamiento en la comparación directa (valores instantáneos de las corrientes o de sus fases) o indirecta (direcciones relativas de las corrientes o de las potencias, a partir de la operación de relevadores direccionales) de las señales provenientes de todas las terminales de la línea de transmisión.

Si la protección ubicada en un extremo de la línea de transmisión recibe información correspondiente a esa terminal solamente (protección direccional de sobrecorriente o de distancia), resulta prácticamente imposible que sea capaz de discriminar correctamente entre las fallas en el extremo final de la línea protegida o en el inicio de la línea adyacente, que por ser puntos muy cercanos entre sí, dan lugar a valores muy semejantes de la corriente o la impedancia medida por la protección. Sin embargo, esas dos fallas representan condiciones muy diferentes cuando la información se recibe en el otro extremo de la línea, debido a que hay una variación de aproximadamente 180 grados en el ángulo de la corriente de uno a otro caso.

En este tipo de protección, la protección de un extremo recibe información desde el otro extremo (a través de un canal de comunicación), definiendo la ubicación precisa de la falla, por lo que se podrá decidir si se origina o no el disparo instantáneo del interruptor de esa terminal. La protección piloto es una protección instantánea, de tipo primario, complementándose con protecciones de respaldo.

Con este esquema se obtiene una alta velocidad de desconexión, lo que permite:

- Disminución de daño al equipo.
- Disminución de problemas de estabilidad.
- Recierre automático.

Este esquema requiere canales de comunicación para transmitir información de corrientes y voltajes al sitio de determinación de decisiones. Los canales básicos que se utilizan son tres y son los siguientes:

HILO PILOTO

Este tipo consiste generalmente de un circuito de dos hilos del tipo de línea telefónica, ya sea hilo abierto o cable. Con frecuencia dichos circuitos están rentados a la compañía local de teléfonos.

PILOTO POR CORRIENTE PORTADORA

En este esquema, la propia línea de transmisión se emplea como circuito de comunicación. Las señales se aplican a las tres fases a través de un circuito divisor de voltaje L-C. Las señales se confinan a la línea en cuestión mediante filtros de bloqueo L-C en cada extremo ("trampas de línea").

En el esquema de protección por corriente portadora se transmiten corrientes de baja tensión y alta frecuencia (30 kHz a 200 kHz) a lo largo de un conductor de una línea de potencia hacia un receptor en el otro extremo. La tierra y el hilo de guarda funcionan generalmente como conductor de retorno.

PILOTO POR ONDA CENTIMÉTRICA

Un piloto por onda centimétrica es un sistema de radio de muy elevada frecuencia que funciona arriba de 900 MHz. Este canal emplea ondas de longitud muy corta (alta frecuencia), enviando la información a través de la atmósfera con frecuencias de microonda entre antenas direccionales colocadas en lugares distantes.

La onda centimétrica es adecuada aunque no es tan segura como la corriente portadora, ya que el canal puede verse afectado por condiciones atmosféricas adversas que debiliten la señal. Por tal razón, este canal se emplea mejor como disparo por piloto que como bloqueo por piloto. La onda centimétrica tiene teóricamente ventajas sobre la corriente portadora, debido a que está desligada de la línea de potencia.

La ventaja principal de la onda centimétrica es que una falla en la línea protegida no interferirá con la transmisión de una señal de disparo remoto. Esta cualidad hace que las zonas de disparo de alta velocidad en todas las terminales

se superpongan entre ellas en todos los tipos de fallas, de tal modo que para cualquier falla, la protección de una terminal, funcionará por lo menos en alta velocidad.

2.7 ARQUITECTURA DE UN RELEVADOR DIGITAL

En la figura 2.8 se presenta el diagrama de bloques de un relevador digital [3]. Al relevador se le aplican señales analógicas provenientes de los transductores primarios de corriente y potencial y señales discretas que reflejan el estado de interruptores, cuchillas y otros relevadores. Estas señales reciben un procesamiento en los subsistemas correspondientes antes de su aplicación a la microcomputadora, que constituye el elemento principal del relevador. Las señales analógicas pasan adicionalmente por un proceso de conversión analógico - digital (A/D) antes de entrar a la unidad central de procesamiento de la microcomputadora. Las señales discretas de salida del relevador reciben procesamiento en el subsistema de salidas discretas, que generalmente incluye relevadores electromecánicos auxiliares para proveerlo de salidas de tipo contacto. El relevador realiza también la función de señalización de su operación (banderas) y de su estado funcional mediante dispositivos de señalización (generalmente de tipo lumínico) visibles en su exterior. La mayoría de los relevadores digitales tienen la capacidad de comunicarse con otros equipos digitales, mediante puertos de tipo serie y paralelo.

El subsistema de señales analógicas de un relevador digital tiene las funciones siguientes:

- a) Acondicionar las señales de voltaje y corriente provenientes de los transductores primarios a voltajes adecuados para la conversión A/D.
- b) Aislar eléctricamente los circuitos electrónicos del relevador de los circuitos de entrada.
- c) Proteger al relevador contra sobrevoltajes transitorios inducidos en los conductores de entrada originados por conmutaciones y otros procesos transitorios en el sistema primario o en los circuitos secundarios del esquema de protección.

- d) Hacer el filtrado "anti-aliasing" de las señales analógicas de entrada. Este filtrado es necesario para limitar el espectro en frecuencia a una frecuencia no mayor que la mitad de la frecuencia de muestreo empleada por el relevador.

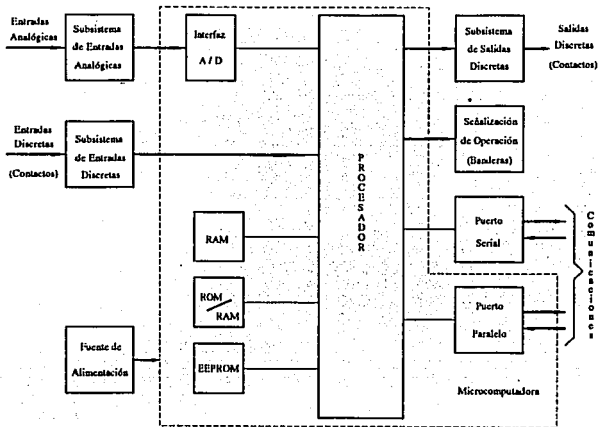


Fig. 2.8 Diagrama de Bloques de un Relevador Digital

El subsistema de entradas discretas tiene la función de acondicionar las señales (lo que incluiría una fuente de alimentación auxiliar para censar el estado de contactos), dar aislamiento eléctrico necesario entre las entradas y los circuitos electrónicos y proteger al relevador contra sobrevoltajes transitorios.

En la interfaz analógico-digital se llevan a cabo los procesos de muestreo y conversión A/D de las señales analógicas. El reloj de muestreo genera pulsos de corta duración y de una cierta frecuencia marcando los instantes de muestreo. En cada uno de ellos se hace la conversión del valor instantáneo de la señal analógica a una palabra digital.

Existen las siguientes variantes para el muestreo de señales analógicas:

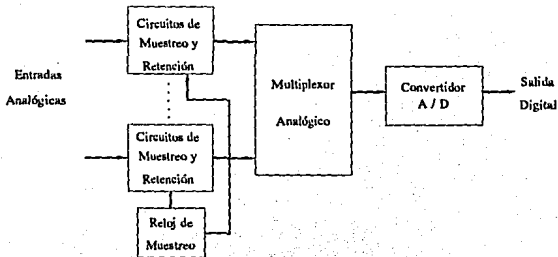
- a) Tomar muestras con espaciamiento uniforme durante todo el ciclo de la señal. Esta es la variante más utilizada en relevadores digitales. La frecuencia de muestreo es del orden de 240 Hz a 2 kHz.
- b) Muestrear con alta frecuencia durante parte del ciclo, detener el muestreo para procesar los datos, y reanudarlo posteriormente.
- c) Muestrear con baja frecuencia en régimen normal del sistema, y conmutar a una frecuencia mayor en caso de falla.

En realidad se hace más de una conversión en cada instante de muestreo, pues el relevador tiene varias señales analógicas de entrada. Una alternativa para esto es hacer un multiplexado analógico de las señales de entrada y aplicarlas secuencialmente a un convertidor A/D (2.9a). El proceso de conversión y transmisión de cada señal al procesador debe ser muy rápido si se desea que las muestras sean simultáneas.

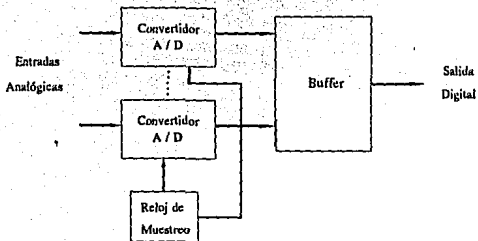
Otra variante consiste en hacer por separado un muestreo simultáneo de cada señal y retener los valores de las muestras para su conversión y transmisión al procesador con velocidad relativamente baja (2.9b). Una tercera alternativa es utilizar convertidores A/D independientes en los distintos canales de entrada (2.9c), elevando el costo del esquema.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.9 Alternativas de Muestreo y Conversión A/D en un Relevador.

El procesador del relevador digital (fig. 2.8) es el encargado de ejecutar los programas de protección, de controlar diversas funciones de tiempo y de realizar tareas de autodiagnóstico y de comunicación con los periféricos.

Un aspecto importante de un relevador digital es su capacidad de comunicación. Las interfaces de comunicación serie (fig. 2.8) permiten el intercambio de información remota fuera de línea con el relevador para tareas de asignación de valores de parámetros de ajuste, de lectura de registros de fallas o de datos de ajustes y otras. Para el intercambio de información en tiempo real es necesario disponer de una interfaz de comunicación paralela.

El subsistema de salidas discretas (fig. 2.8) procesa la información de un puerto paralelo de salida del procesador, consistente en un palabra digital en que cada bit puede ser utilizado para definir el estado de un contacto de salida. Debe existir acoplamiento óptico entre este puerto y el relevador auxiliar o un tiristor de salida del relevador.

El relevador digital debe contar con una fuente de alimentación independiente (fig. 2.8), generalmente de tipo conmutado, que puede conectarse a la batería de acumuladores de la subestación y producir los voltajes de corriente directa necesarios para los circuitos del relevador (típicamente 5V y ± 15 V).

2.8 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS RELEVADORES Y SISTEMAS DIGITALES DE PROTECCION.

La tecnología digital tiene un conjunto de ventajas sobre la analógica, entre las que pueden mencionarse :

- a) Las características de las componentes digitales no cambian con la temperatura, el voltaje de suministro o el envejecimiento.
- b) El comportamiento de las componentes digitales se mantiene invariable en todo el sistema.
- c) Los equipos basados en tecnología digital tienen menos componentes y menos conexiones.

- d) La resolución de un equipo digital depende del número de bits por palabra utilizado en los cálculos aritméticos.
- e) Los equipos digitales no requieren ajuste individual.
- f) La mayoría de los cambios de diseño implican solamente modificaciones de "software".
- g) Un sistema digital puede hacer funciones lógicas y aritméticas en el control de un proceso.
- h) Los datos almacenados en un sistema digital no se deterioran, a menos que haya una falla en el sistema.

La introducción de la tecnología digital en el área de protección de sistemas eléctricos de potencia confiere a los relevadores y sistemas digitales de protección y, en particular, a los microprocesados, ventajas definidas con respecto a sus similares analógicos. Estas ventajas son:

- a) El costo de los relevadores digitales es ya comparable con el de los analógicos, en algunos casos es menor, y su tendencia es a decrecer.
- b) Los relevadores digitales tienen capacidad de autodiagnóstico, lo que los hace más confiables que los analógicos.
- c) Estos relevadores son totalmente compatibles con la tecnología digital que se introduce en las subestaciones.
- d) Tienen una gran flexibilidad funcional que les permite realizar otras funciones, tales como: medición, control y supervisión.
- e) Tienen capacidad de comunicación con otros equipos digitales de la subestación y el sistema.
- f) Pueden constituir la base de una protección adaptiva, cuyos parámetros de operación cambian automáticamente con las condiciones del sistema.

En la actualidad existen factores que impiden aprovechar plenamente las posibilidades potenciales de la protección digital; entre ellos pueden señalarse:

- a) Hay un desarrollo insuficiente de las redes de comunicación, que limita las posibilidades que ofrece la capacidad de comunicación de los relevadores.

- b) El "hardware" de los relevadores digitales cambia con gran velocidad, lo que dificulta su mantenimiento.
- c) Predomina la utilización de lenguaje ensamblador en los relevadores digitales, lo que limita la transportabilidad de los programas entre distintos relevadores.
- d) Aún hay dificultades para la adaptación de los relevadores digitales a las condiciones ambientales y de interferencias electromagnéticas en una subestación.

En diferentes países se trabaja en la solución de estos problemas, y los resultados son prometedores. Una prueba de ello es que los relevadores digitales ya han demostrado su superioridad sobre los analógicos en más de diez años de experiencia de explotación y son preferidos en la actualidad por la mayoría de los ingenieros de protección.

2.9 PROTECCION DIGITAL DE LINEAS DE TRANSMISION.

En el sistema eléctrico nacional, el punto más débil en cuanto a fallas se refiere, lo constituye el sistema de transmisión, estas fallas pueden constituirse en disturbios más severos para la red si no son debidamente controlados, razón por la que se debe tratar de minimizar el número y severidad de las mismas.

La protección digital de líneas de transmisión ha sido un área de mucho interés desde las primeras etapas de desarrollo de esta técnica. Esto se explica por el reto que representa la complejidad del problema, por la potencialidad de las protecciones digitales para superar las características funcionales de las versiones analógicas, y por el incentivo económico, dado por la posibilidad de competir en un mercado demasiado amplio.

La información más reciente sobre protección digital de líneas de transmisión, es el desarrollo de algoritmos. Cuando se ejecutan como programas de computadora, estos algoritmos procesan las muestras de voltaje de corriente alterna (c.a.) y corriente provenientes de la línea hacia las cantidades numéricas empleadas para localización de fallas ó tomando decisiones. La elección de velocidad contra exactitud depende del trabajo particular que el algoritmo este haciendo dentro de la función total de

protección de la línea. En algunos casos es posible y deseable un algoritmo para ajustar su velocidad de operación de acuerdo a la calidad de los datos.

ALCANCE DEL TIPO DE FALLA.

La capacidad de protección del relevador debe encargarse de todas las combinaciones de fallas de fase y tierra. Esto se hace de una de las siguientes maneras:

1. Un selector del tipo de falla el cual escoge el tipo de falla más probable Este esquema es computacionalmente el más simple pero debe ser cuidadosamente diseñado para minimizar la posibilidad de una elección equivocada y consecuentemente una demora en el disparo del relevador.
2. Un grupo de programas cubriendo todos los tipos de fallas de manera de ejecutarse simultáneamente. Esto es muy confiable pero requiere una gran capacidad de proceso.
3. Uno o dos algoritmos polifásicos que respondan a todos los tipos de falla. Este es más eficiente que el método anterior pero de mayor desarrollo computacional que el primero.

Si se requiere de un disparo en una falla monofásica, los programas deben tener la habilidad de seleccionar la fase fallada de tal manera que mantenga el disparo.

2.10 PROTECCION DIGITAL DE TRANSFORMADORES, BUSES Y GENERADORES

PROTECCION DE TRANSFORMADORES

Las condiciones anormales de operación posibles en transformadores y autotransformadores no tienen la diversidad encontrada en los generadores. Las fallas son los cortocircuitos entre fases o a tierra en los devanados o en las terminales del transformador, y los cortocircuitos entre espiras del devanado de una fase. Entre los regímenes anormales de operación están las sobrecorrientes debidas a sobrecargas o cortocircuitos externos y los sobrevoltajes.

Se recomienda que la protección provoque el disparo instantáneo de todos los interruptores del transformador en caso de falla interna (protección primaria), y que también desconecte el transformador en caso de cortocircuito externo, a modo de respaldo. Por lo general no se requiere protección externa contra sobrecarga, pues el transformador (excepto los de capacidad relativamente pequeña) tiene una protección inherente. Los sobrevoltajes sostenidos pueden ser dañinos para los transformadores, sobre todo si sobrepasan el valor de saturación, pero casi nunca se requiere dotar al transformador de una protección contra aquellos, pues está incluida en los equipos de regulación y control del sistema. La excepción son los transformadores elevadores de las plantas generadoras, que pueden estar sometidos a sobrevoltajes cuando la planta queda aislada del sistema, y requieren protección contra esta condición anormal. Esta protección se brinda por lo general en forma conjunta para el generador y el transformador.

La protección digital de transformadores ha recibido mayor atención que la de generadores y barras, por la facilidad que brinda el procesamiento digital para resolver los problemas de filtrado inherentes a esta protección. Por otra parte, en los últimos años se han propuesto algoritmos que resuelven en forma novedosa el problema de discriminar entre los cortocircuitos internos y los regímenes de variación súbita del voltaje aplicado al transformador o de sobreexcitación. En esto influye el hecho de que, en un sistema integrado de protección y otras funciones de una subestación, la información de voltaje también puede estar disponible para la función de protección diferencial del transformador.

PROTECCION DE BUSES

Ha habido relativamente poca información referente a este tipo de protección. Esto refleja el hecho de que la existencia de relevadores diferenciales de bus hayan dado confianza y seguridad empleando "hardware" y características de operación sencillas. Incluso aunque el costo de los componentes del "hardware" para relevadores digitales está disminuyendo, hay todavía poca iniciativa para reemplazar los diseños de relevadores convencionales.

Sin embargo, surge un interés en este tipo de protección, en conjunción con el diseño y desarrollo de sistemas integrados para relevadores, monitoreo y control de subestaciones.

Una vez que la protección digital de buses se justifique, el diseño de relevadores puede utilizar la computadora para vencer las deficiencias en relevadores convencionales de bus diferencial.

En la actualidad, los esquemas de protección de buses emplean varios métodos incluyendo mediciones de corriente diferencial, y comparación direccional o de fase. Sin embargo, la mayoría de las instalaciones emplean la suma de corrientes diferenciales de señales por cada fase.

PROTECCION DE GENERADORES

Los generadores son los elementos del sistema eléctrico de potencia que pueden estar sometidos al mayor número de condiciones anormales de operación diferentes, lo que confiere una gran diversidad a sus protecciones. Estas condiciones anormales pueden deberse al propio generador, a su motor primario, o al sistema eléctrico con que está interconectado, y pueden en general subdividirse en fallas internas y regímenes anormales de operación.

No existe un criterio único para determinar las protecciones que deben instalarse en un generador en particular. La capacidad, el tipo y la importancia relativa del generador en el sistema son aspectos determinantes, pero también influyen otros, tales como: su conexión y los tipos de sistemas de control y protección que tiene.

El número relativamente pequeño de plantas generadoras existentes en un sistema eléctrico de potencia ha limitado en alguna medida el desarrollo de protecciones digitales de generadores. En los últimos años ha aumentado el interés en estas protecciones, debido a la tendencia a la interconexión de pequeñas plantas generadoras con el sistema eléctrico para aprovechar la generación de energía eléctrica. Por otra parte, en los sistemas computarizados de control de grandes plantas generadoras es posible y recomendable incorporar las funciones de protección.

**ALGORITMOS DE PROTECCION DE LINEA POR
CALCULO DE IMPEDANCIA**

3.1 CONSIDERACIONES SOBRE LOS ALGORITMOS DE PROTECCION DIGITAL

Se ha trabajado intensamente en el desarrollo de algoritmos para la protección de distancia de líneas de transmisión. Existen algunos basados en la modelación de las señales de entrada, y otros basados en la modelación de la línea de transmisión. Pueden identificarse cuatro grupos básicos de algoritmos, de los cuales los tres primeros son de modelación de las señales y el cuarto, de modelación de la línea de transmisión:

- a) Algoritmos que consideran solamente la componente fundamental de las señales. Estos calculan las componentes R y X de la impedancia aparente a partir de las muestras de voltaje y corriente.
- b) Algoritmos que consideran la componente fundamental y las armónicas superiores de las señales. A este grupo pertenecen los algoritmos basados en las transformaciones de Fourier y Walsh con ventana de datos de un ciclo. Los algoritmos de Fourier con ventana de menos de un ciclo pertenecen al grupo (a), pues no admiten las armónicas superiores.
- c) Algoritmos que consideran la componente fundamental, las armónicas superiores y la componente aperiódica de las señales y hacen la estimación de parámetros empleando técnicas de ajuste de curvas.
- d) Algoritmos basados en la solución de la ecuación diferencial de la línea. Pueden considerar la componente aperiódica solamente o también la componente transitoria de alta frecuencia, dependiendo del modelo de línea que se elija.

Los algoritmos que consideran menos componentes de las señales son más sencillos, pero requieren un mejor filtrado previo. La consideración de la componente aperiódica incrementa la complejidad de los algoritmos, sobre todo

en el caso de los de ajuste de curvas. Una ventaja de los algoritmos basados en la solución de la ecuación diferencial es que se considera la componente aperiódica sin gran aumento de la complejidad. La consideración de la componente de alta frecuencia los hace más complejos, pero el filtrado previo resuelve el problema con buena exactitud.

3.2 ALGORITMO DE FILTRADO DIGITAL.

Las señales de entrada a los relevadores de protección están contaminadas con diferentes tipos de ruidos, lo que hace necesario un filtrado previo adecuado para extraer la información útil. Un filtro analógico es un dispositivo que realiza operaciones de filtrado de una señal analógica (continua), mientras que un filtro digital es un algoritmo que efectúa el proceso de una señal digital discreta. En los relevadores electromecánicos el filtrado se logra en forma inherente, dada la inercia de su respuesta y el retardo de tiempo resultante. La mayor velocidad de operación de los relevadores estáticos hace necesario considerar explícitamente el filtrado en el diseño del relevador. En los relevadores estáticos analógicos el filtrado es necesariamente analógico, en los digitales pueden combinarse variantes analógicas y digitales.

Los relevadores digitales son de alta velocidad de respuesta y se emplean en sistemas eléctricos de gran complejidad. Los disturbios por lo general originan señales de muy alta frecuencia, por lo que el relevador debe determinar, dentro de ciertos límites, el tipo y localización de la falla. Esto impone requerimientos muy elevados de exactitud a los filtros analógicos y digitales.

La característica principal de un filtro digital [4] es su respuesta a un muestreo de entrada. Esta respuesta puede ser de duración finita o infinita:

- **Filtro FIR** (Respuesta al impulso de duración finita).
- **Filtro IIR** (Respuesta al impulso de duración infinita).

Un filtro digital FIR puede diseñarse de forma no recursiva, esto significa que no necesita muestras de salida para su desarrollo; por otro lado, un filtro digital IIR funciona de manera recursiva, empleando valores de salida anteriores.

Filtro Digital Recursivo

El algoritmo de un filtro paso-bajas recursivo de orden N se puede describir con la siguiente ecuación :

$$Y_k = \sum_{m=0}^N A_m X_{k-m} - \sum_{m=1}^N B_m Y_{k-m} \quad (3.1)$$

donde X_k es la k-ésima muestra de la señal de entrada y Y_k es la k-ésima muestra de salida filtrada. Para un filtro de tercer orden se tiene :

$$Y_k = AY_{k-1} + BY_{k-2} + CY_{k-3} + DX_k + EX_{k-1} + FX_{k-2} + GX_{k-3} \quad (3.2)$$

Filtro Digital No Recursivo.

La siguiente ecuación es el algoritmo de un filtro digital paso-bajas [5], el cual representa la relación entre las señales no filtradas, X_{k-m} , y la correspondiente señal de salida filtrada Y_k .

$$Y_k = \sum_{m=-N}^N h_m X_{k-m} \quad (3.3)$$

Estas señales de entrada y salida se relacionan por medio de factores de peso del filtro h_m , los cuales son constantes para algún diseño específico. Los factores de peso del filtro se determinan diseñando el filtro y sus magnitudes dependen de las características de la banda de paso del filtro.

El número de los factores de peso del filtro es de $2N+1$, donde N es el orden del filtro.

3.3 ALGORITMO DE ECUACION DIFERENCIAL.

Este algoritmo se basa en la solución de la ecuación diferencial de la línea de transmisión, considerando su modelo RL simple, figura 3.1.

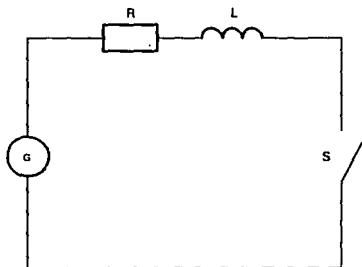


Fig. 3.1 Modelo RL Simple de una Línea de Transmisión.

Las señales de voltaje y corriente de entrada al relevador (considerando relaciones de transformación unitarias en los transformadores de corriente y potencial) se relacionan por medio de la ecuación que constituye la base del algoritmo.

El disturbio transitorio originado por una falla está caracterizado por la siguiente ecuación :

$$V = R i + L \frac{di}{dt} \quad (3.4)$$

De manera general, la protección de distancia hace su medición en términos de la razón entre el voltaje y la corriente que recibe a través de los transformadores de instrumento. Puesto que la impedancia de una línea es por lo general uniforme, la protección que mide la impedancia, también mide la distancia a la falla.

$$Z_L = \frac{V}{I_r} = R_L + jX_L \quad (3.5)$$

donde Z_L es la impedancia aparente de la línea, V es el voltaje de fase a neutro, I_r es la corriente de línea y R_L y X_L son la resistencia y la reactancia de la línea.

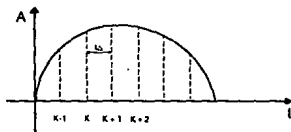


Fig. 3.2 Muestreo de una Señal.

La esencia del algoritmo consiste en obtener una ecuación en diferencias finitas equivalente a la ecuación diferencial de la línea de transmisión. Los coeficientes de dicha ecuación están expresados en términos de los parámetros físicos de la línea, de modo que si se conocen las secuencias de valores discretos del voltaje y la corriente, es posible calcular con un número reducido de operaciones algebraicas, la impedancia de falla.

Si se toman muestras de voltajes y corrientes en incrementos de tiempo uniformes t_{Δ} (fig. 3.2) y se sustituye la derivada en (3.4) por su diferencia central finita para cada uno de los dos conjuntos sucesivos de muestras, se llega a la siguiente ecuación matricial :

$$\begin{bmatrix} i_k & \frac{i_{k+1} - i_{k-1}}{2t_{\Delta}} \\ i_{k+1} & \frac{i_{k+2} - i_k}{2t_{\Delta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \\ V_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Obteniéndose los siguientes valores de resistencia y de reactancia:

$$R_L = \frac{V_k(i_{k+2} - i_k) - V_{k+1}(i_{k+1} - i_{k-1})}{i_k(i_{k+2} - i_k) - i_{k+1}(i_{k+1} - i_{k-1})} \quad (3.7)$$

$$X_L = \frac{4\pi}{n} \left[\frac{V_{k+1}(i_k) - V_k(i_{k+1})}{i_k(i_{k+2} - i_k) - i_{k+1}(i_{k+1} - i_{k-1})} \right] \quad (3.8)$$

donde :

n = Número de muestras por ciclo.

V_k = Valores instantáneos de voltaje (muestras).

I_k = Valores instantáneos de corriente (muestras).

3.4 ALGORITMO DE ANALISIS DE FOURIER.

Las técnicas de análisis de Fourier [6] se aplican a los valores de las muestras de entrada para obtener la amplitud de la frecuencia fundamental. Las señales de entrada del relevador se muestrean y almacenan durante un periodo de la frecuencia fundamental. Esta técnica considera que las señales de entrada son repetitivas durante este periodo.

Este algoritmo correlaciona muestras de voltajes y corrientes de falla de un ciclo completo con ondas seno y coseno para extraer el vector complejo de frecuencia fundamental.

Las ecuaciones (3.9) y (3.10) dan las componentes seno (V_s) y coseno (V_c) de voltaje de una muestra k .

$$V_s = \frac{1}{N_c} \left[2 \sum_{n=1}^{N_c-1} V_{k-N_c+n} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{N_c} n \right) \right] \quad (3.9)$$

$$V_c = \frac{1}{N_c} \left[V_{k-N_c} + V_k + 2 \sum_{n=1}^{N_c-1} V_{k-N_c+n} \cos \left(\frac{2\pi}{N_c} n \right) \right] \quad (3.10)$$

donde:

V_k = Valores instantáneos (muestras).

N_c = Número de muestras tomadas en un ciclo.

Los factores $\operatorname{sen}(2\pi n/N_c)$ y $\cos(2\pi n/N_c)$ son constantes y pueden almacenarse en la computadora como factores de peso de las muestras

tomadas. Consideraciones semejantes pueden hacerse para los valores instantáneos de las corrientes. Las siguientes ecuaciones muestran el cálculo de la resistencia y reactancia aparente de falla (R_L , X_L):

$$R_L = \frac{V_S I_S + V_C I_C}{I_S^2 + I_C^2} \quad (3.11)$$

$$X_L = \frac{V_C I_S - V_S I_C}{I_S^2 + I_C^2} \quad (3.12)$$

De acuerdo con el teorema de muestreo, 20 muestras por ciclo dan buena información hasta la décima armónica. La quinta armónica es suficiente para determinar si hubo un arco en la falla, por lo que 10 muestras por ciclo son adecuadas para este método. Para un índice de muestreo de 12 muestras por ciclo la cantidad de operaciones se reduce aún más, teniéndose sólo dos constantes para el desarrollo del algoritmo, como se muestra a continuación:

$$V_S = 2[AV_2 + BV_3 + V_4 + BV_5 + AV_7 - AV_8 - BV_9 - V_{10} - BV_{11} - AV_{12}]$$

$$V_S = 2[A(V_2 + V_6 - V_8 - V_{12}) + B(V_3 + V_5 - V_9 - V_{11}) + V_4 - V_{10}] \quad (3.13)$$

$$V_C = V_1 + V_{13} + 2[BV_2 + AV_3 - AV_5 - BV_6 - V_7 - BV_8 - AV_9 + AV_{11} + BV_{12}]$$

$$V_C = V_1 + V_{13} + 2[A(V_3 - V_5 - V_9 + V_{11}) + B(V_2 - V_6 - V_8 + V_{12}) - V_7] \quad (3.14)$$

El factor $1/Nc$ desaparece al calcular R_L y X_L con las ecuaciones (3.11) y (3.12). Las constantes A y B se determinan sustituyendo los valores de n y Nc dan como resultado:

$$A = 0.5000$$

$$B = 0.8660$$

Esta comprobación nos indica una reducción aún más en el número de sumas y multiplicaciones empleadas en el algoritmo como se puede apreciar.

3.5 ALGORITMO DE ANALISIS DE WALSH

El análisis de Walsh [7] descompone una función en un conjunto de ondas y semiondas cuadradas. La impedancia de un sistema lineal está definida en términos de las formas de ondas senoidales de tensiones y corrientes, por lo que será necesario establecer una conexión entre los resultados del análisis de Walsh y las ondas senoidales del análisis de Fourier. Se puede decir entonces que las impedancias calculadas con las componentes de Walsh son una aproximación aceptable de las impedancias obtenidas en la forma convencional mediante componentes armónicas.

Esta técnica elimina las multiplicaciones y opera solo con sumas, restas y cambios. La señal, entonces, puede analizarse en base a sus funciones de Walsh, $wal(k,t)$ en vez de sus funciones seno y coseno. Por lo que las componentes seno (V_s) y coseno (V_c) se calculan a partir de los apropiados coeficientes de Walsh, W_k . Las funciones de Walsh solo tienen dos valores, ± 1 como se muestra en la figura 3.3.

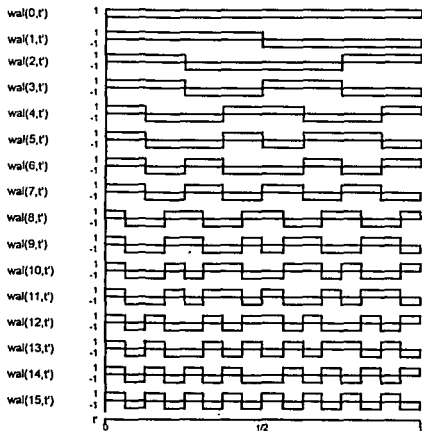


Fig. 3.3 Primeras 16 Funciones de Walsh.

Para resolver la integral se emplea la regla trapezoidal y para discretizar $v(t)$ y $wal(k, t')$, se definen las equivalencias (3.20a) y (3.20b) para llegar a la igualdad (3.20c):

$$v_j \equiv (j\Delta t) \quad (3.20a)$$

$$W_j = wal\left[k, \frac{j\Delta t}{T}\right] \quad (3.20b)$$

$$f_i = v_j W_j(k) \quad (3.20c)$$

Por ejemplo, si se tienen 16 muestras por ciclo, y con la ayuda de la figura 3.3 se encuentran las siguientes igualdades:

$$W_1(k) = \frac{V_k}{2} + V_{k+1} + V_{k+2} + V_{k+3} + V_{k+4} + V_{k+5} + V_{k+6} + V_{k+7} - V_{k+9} - V_{k+10} \\ - V_{k+11} - V_{k+12} - V_{k+13} - V_{k+14} - V_{k+15} - \frac{V_{k+16}}{2} \quad (3.21a)$$

$$W_2(k) = \frac{V_k}{2} + V_{k+1} + V_{k+2} + V_{k+3} - V_{k+5} - V_{k+6} - V_{k+7} - V_{k+8} - V_{k+9} - V_{k+10} \\ - V_{k+11} + V_{k+13} + V_{k+14} + V_{k+15} + \frac{V_{k+16}}{2} \quad (3.21b)$$

$$W_3(k) = \frac{V_k}{2} + V_{k+1} - V_{k+3} - V_{k+4} - V_{k+5} + V_{k+7} - V_{k+9} + V_{k+11} + V_{k+12} + V_{k+13} \\ - V_{k+15} - \frac{V_{k+16}}{2} \quad (3.21c)$$

$$W_6(k) = \frac{V_k}{2} + V_{k+1} - V_{k+3} + V_{k+5} - V_{k+7} - V_{k+8} - V_{k+9} + V_{k+11} - V_{k+13} + V_{k+15} \\ + \frac{V_{k+16}}{2} \quad (3.21d)$$

Con los valores obtenidos se sustituyen en las ecuaciones (3.11) y (3.12) y se obtienen los valores de resistencia y de reactancia requeridos.

3.6 ALGORITMO DE DISPARO

Un aspecto importante es el referente a la utilización de los resultados del algoritmo para formar la señal de disparo del relevador. Si el algoritmo eliminara totalmente las componentes transitorias de las señales de entrada, la señal de disparo podría emitirse desde la primera vez que la impedancia aparente entrara en la característica de operación del relevador. Por tanto, si se utiliza este criterio de disparo, el relevador tiene un sobrealcance transitorio exactamente igual al error de estimación del algoritmo.

Se requiere, por tanto, un cierto procesamiento de los resultados del algoritmo para la formación de la señal de disparo. Uno de los métodos de post-procesamiento consiste en acumular en un contador las condiciones de operación detectadas por el algoritmo, y emitir la señal de disparo cuando el valor acumulado rebasa cierto nivel. Otro método es el de integración de los resultados, mediante el cálculo del valor promedio de varios estimados antes de proceder a la comparación con la característica de operación del relevador.

Para poder determinar si la información recibida por el sistema corresponde a una falla de determinada intensidad y proceder a mandar una señal de disparo o de alarma, se desarrolló un sencillo algoritmo de disparo, el cual se basa en los siguientes pasos:

1. Obtención de los datos de falla filtrados.
2. Cálculo del valor de resistencia y reactancia para dichos datos muestreados.
3. Realizar una comparación de la resistencia y la reactancia obtenida con la zona de protección definida en el programa. En caso de localizarse tres de estos valores dentro de la misma zona de protección, se pasa al estado de disparo en donde se activará una alarma auditiva (beeps) indicando la detección de la falla, en caso contrario el cálculo continúa.

CONSIDERACIONES DE HARDWARE PARA UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE PROTECCION DE DISTANCIA

4.1 INTRODUCCION.

El "hardware" de un sistema de protección digital tiene el mismo propósito que el "hardware" de la protección convencional, a saber : mediciones de amplitudes de voltajes y corrientes, otros datos de fuentes analógicas y datos de circuitos de control, esto por medio del cierre de contactos o el switcheo de interruptores. Los requerimientos generales de un relevador de protección son los que emplean los sistemas digitales, tal como el procesamiento digital de señales.

Una ventaja importante de los sistemas digitales sobre los analógicos es la capacidad de almacenar fácilmente grandes cantidades de información digital por periodos cortos o largos. Esta capacidad de memoria es la que hace que los sistemas digitales sean tan versátiles y adaptables a muchas situaciones. Por ejemplo, en una computadora digital la memoria principal almacena instrucciones que indican a la computadora que hacer en todas las circunstancias posibles, de manera que la computadora haga su trabajo en una mínima cantidad de intervención humana.

Ya que el procesador digital requiere tiempo para procesar los datos entre un par de observaciones, las cantidades de entrada (voltajes y corrientes) deben ser medidas en intervalos de tiempo y las cantidades de salida (posición de contactos), deben ser actualizados también en intervalos de tiempo. El tiempo entre observaciones puede variar de segundos a microsegundos.

El procesamiento analógico consta de un multiplexaje para posteriormente ser amplificada la señal por medio de un amplificador de ganancia para después convertir las señales continuas a señales discretas por medio de circuitos de muestreo/retención. Después del muestreo, los datos analógicos se transforman a valores digitales y se suministran al procesador. El procesador lee los datos

de entrada y el estado de contactos para posteriormente realizar funciones de protección y otros cálculos para actualizar las salidas de los contactos.

La tecnología de circuitos de integración a gran escala (LSI) ha reducido el costo de los procesadores centrales a tal nivel que ahora es muy atractiva y viable la aplicación de procesadores múltiples para encontrar los requerimientos de desarrollo de sistemas. Además, las ventajas específicas del empleo de procesadores múltiples ha incrementado el mejoramiento y desarrollo de sistemas, así como la seguridad y respuesta en tiempo real.

El principio de los sistemas de multiproceso se basa en un conjunto de funciones de todo el sistema, encaminadas hacia tareas que cada uno de los procesadores pueda manejar de manera simultánea o en paralelo. Este principio lo emplearon Jeyasurya y Smolinski [8] para diseñar un prototipo de relevador digital de distancia mostrado en la figura 4.1. Este prototipo se basa en dos diseños particulares de tarjetas de computadora que emplean una arquitectura de Multibus [9] para facilitar las operaciones de multiproceso.

Ambas tarjetas comparten una misma memoria, que se encuentra conectada al bus del sistema. El empleo de este bus se minimiza con la implantación de una estructura "bus-dual" mostrada en la figura 4.1. Cada uno de los dos procesadores conserva su propia memoria y el bus de entrada-salida que utilizan para la mayoría de las operaciones. Estas operaciones locales se realizan de manera individual en cada tarjeta y no requieren del bus del sistema.

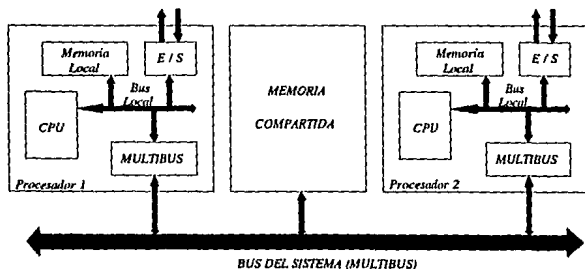


Fig. 4.1 Sistema de Multiproceso.

El "hardware" empleado en el prototipo desarrollado por Jeyasurya se muestra en las figuras 4.2 y 4.3. La figura 4.2 muestra el diagrama de bloques del circuito de generación de transitorios. Las muestras de voltaje y corriente son almacenadas en memorias EEPROM. Los valores de las señales se obtuvieron de una simulación con computadora digital empleando un modelo de línea de transmisión trifásica. La figura 4.3 presenta el diagrama de bloques del relevador digital empleado, éste consiste de dos tarjetas Intel SBC 86/05 y una tarjeta de memoria compartida; estas se encuentran comunicadas por el bus del sistema (multibus).

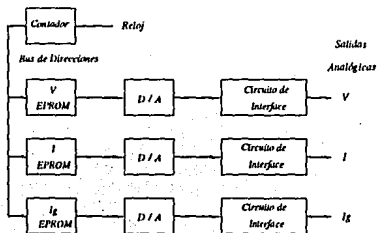


Fig. 4.2 Generador de Señales de Falla Desarrollado por Jeyasurya.

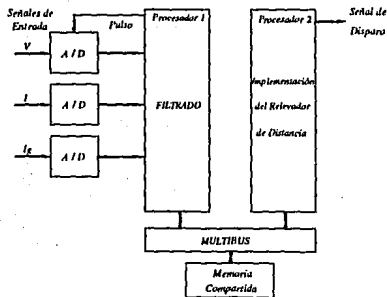


Fig. 4.3 "Hardware" Empleado en el Prototipo de Relevador Digital Desarrollado por Jeyasurya.

ARQUITECTURA DEL PROTOTIPO.

En la figura 4.4 se muestran los módulos que componen el simulador de protección digital desarrollado en este trabajo.

El prototipo del sistema de protección digital se conceptualizó como un sistema de generación de transitorios, de adquisición de datos, un procesamiento de señales y un despliegue que muestre los resultados del funcionamiento del relevador.

Se emplearon dos tarjetas DATA TRANSLATION de la serie DT2801, modelo DT2801-A, para computadoras IBM o compatibles. Este tipo de tarjetas son de alto desarrollo tecnológico.

Las tarjetas se conectan a una de las ranuras o slots de expansión de la computadora. Contienen un convertidor A/D, dos convertidores D/A, dos puertos digitales de entrada y salida de datos (E/S); estos pueden usarse de manera separada para leer o escribir transferencia de 8 bits ó simultáneamente para transferencia de 16 bits, y un reloj programable que puede ser empleado para obtener la adquisición de datos en forma precisa, además de proporcionar impulsos de reloj para controlar las operaciones de los subsistemas A/D y D/A. Las especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos se encuentra en el apéndice A.

La arquitectura del prototipo está basado en una arquitectura de dos computadoras personales y está compuesto por los siguientes módulos:

- **Módulo de Generación de Transitorios.**
- **Módulo de Adquisición de Datos.**
- **Módulo de Cálculo y de Resultados.**

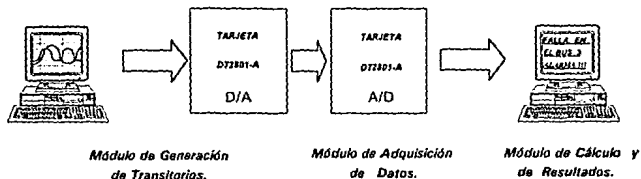


Fig. 4.4 Módulos del Simulador de Protección Digital.

4.2 MODULO DE GENERACION DE TRANSITORIOS.

Para obtener los datos de falla e introducirlos al programa de generación, se utilizaron los resultados obtenidos de un programa digital desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en donde el sistema y los cortocircuitos se modelaron matemáticamente y las formas de onda se calcularon digitalmente. Para este prototipo se emplearon los resultados obtenidos de un modelo de línea de transmisión trifásica.

Las señales generadas en este módulo, se envían en forma digital por medio del bus de la computadora personal, hacia el dispositivo de conversión D/A de 12 bits.

Dependiendo del número de líneas a proteger, será el número de canales de salida (siete por línea). En una aplicación real, las señales se obtendrán de los transformadores de corriente y de potencial

En estas tarjetas, los dos convertidores D/A únicamente proporcionan voltajes en sus salidas y no una salida de corriente como sería en forma real, por lo que se desarrolló este módulo solo para simular la amplitud de las señales de salida que se tienen en los transformadores. En una aplicación real no existiría este módulo.

Debido a que se tienen únicamente 2 canales de conversión D/A por cada tarjeta, se tuvo que adecuar el sistema para poder generar solo dos señales de falla y no siete que sería en una aplicación real, por lo tanto únicamente se desarrollaron los datos de voltaje y de corriente de falla de manera separada para cada fase. La falla únicamente requiere de la generación de 2 señales, empleando para tal finalidad, una señal de falla de salida para cada convertidor.

4.2.1 ARQUITECTURA DE LA TARJETA.

En este módulo se tiene conectada una tarjeta a una computadora personal, la cual tiene 2 convertidores D/A de 12 bits, los cuales pueden dar dos tipos de salidas : salidas secuenciales (sus salidas analógicas cambian a diferentes tiempos) y salidas simultáneas (sus salidas cambian al mismo tiempo). En este prototipo se emplearon salidas simultáneas que correspondería a una aplicación real.

El trabajo de este convertidor es el de transformar la entrada digital en una salida analógica. El convertidor trabaja con códigos digitales unipolares (el cual únicamente proporciona voltajes positivos desde 0 a +10 Volts o solo negativos desde 0 a -10 Volts) y bipolares (cuyos voltajes pueden ser positivos o negativos desde -10 hasta +10 Volts). El código unipolar incluye el binario puro y el decimal codificado en binario (BCD). El código "gray", complemento a uno y complemento a dos, son para la operación bipolar. El código de entrada aparece por lo común en paralelo, o sea, simultáneamente, en un conjunto de líneas paralelas. Sin embargo, se puede presentar en serie, como un tren de niveles o impulsos sobre una línea simple. La variedad de rangos de salida para los dos convertidores, se selecciona cambiando los puentes que se encuentran en la tarjeta.

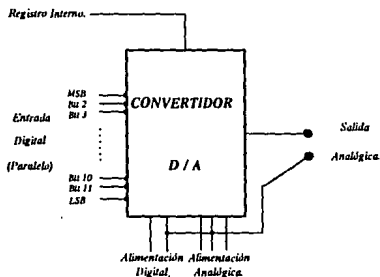


Fig. 4.5 Convertidor Digital / Analógico de 12 bits.

4.3 MODULO DE ADQUISICION DE DATOS.

Existen muchas aplicaciones en que los datos analógicos tienen que ser digitalizados (convertidos en digital) y transferidos a la memoria de una computadora. El proceso por el cual la computadora adquiere estos datos analógicos digitalizados se conoce como adquisición de datos. La computadora puede ejecutar varias tareas con los datos, según la aplicación.

La información en forma digital se puede procesar, almacenar, comunicar y presentar con facilidad, en forma indestructible y sin errores. La existencia de dispositivos de bajo costo para el manejo de datos digitales permite muchas oportunidades para la aplicación de técnicas digitales en la medición, la manipulación y el control de variables del mundo real, tales como voltajes, velocidades, temperaturas, etc. Estas variables se pueden traducir a la forma eléctrica (voltaje, corriente o impedancia). Para comunicarse con el mundo digital esas variables se deben convertir a forma digital, a su vez, los datos regresan por lo general a forma analógica para la presentación o el control de variables del mundo real.

Las señales eléctricas provenientes de los transductores se generan a un nivel de voltaje o corriente dado. La tarjeta de adquisición de datos deberá trabajar a niveles de corriente y de voltaje estándares, de tal manera que se pueda incorporar una etapa de acondicionamiento de señales.

4.3.1 ARQUITECTURA DE LA TARJETA.

Mediante este módulo, el sistema adquiere las señales provenientes del módulo de generación. Contiene un convertidor A/D que puede recibir 16 canales de una terminal (la cual aparece en una terminal única y se mide con respecto a la tierra del circuito y presenta sensibilidad al ruido) u 8 canales de tipo diferencial (cuya señal de información es la diferencia entre las tensiones de los dos cables de entrada, medido cada uno de ellos con respecto a tierra).

Mediante el uso de señales diferenciales se puede eliminar el error debido al ruido. Cuando se utilizan señales diferenciales, el número de canales se reduce a la mitad.

En la figura 4.6 se muestran en forma esquemática los elementos que componen a la tarjeta de adquisición de datos.

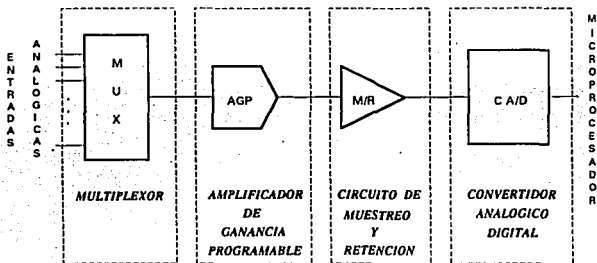


Fig. 4.6 Arquitectura de la Tarjeta de Adquisición de Datos.

Multiplexor.

El multiplexaje es una técnica común que es usada para incrementar el número de canales y manejarlos por un solo convertidor A/D.

El multiplexor es un selector de datos cuyo circuito permite seleccionar cual de varias líneas de entrada se debe conectar a una sola línea de salida que va hacia el amplificador de ganancia.

Este circuito tiene 16 líneas de entrada, que al variar las líneas de selección de datos se efectúa la selección de uno de los canales de entrada al circuito multiplexor, a la vez, estas 4 líneas nos dan 16 combinaciones posibles, por lo que se podrán seleccionar 16 canales analógicos. Para este prototipo únicamente se empleó una línea de selección de datos que corresponde a los canales 0 y 1 respectivamente.

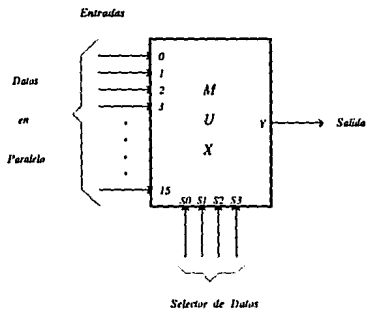


Fig. 4.7 Diagrama de Bloques de un Multiplexor.

Debido a que existe multiplexaje en la adquisición de datos, provoca una recepción de tipo secuencial, lo que originará un error de retraso y por lo tanto, una generación de errores en el desarrollo computacional de los algoritmos.

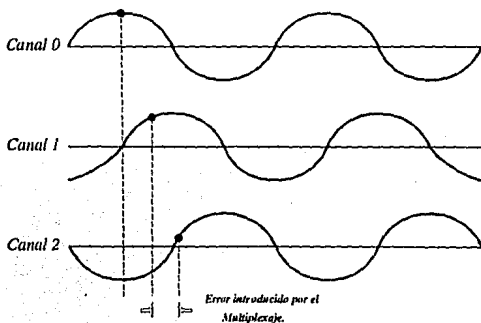


Fig. 4.8 Recepción de Tipo Secuencial.

Amplificador de Ganancia Programable.

La tarea más sencilla del procesamiento de señales, es la amplificación. La necesidad de amplificación se presenta en virtud de que los transductores proporcionan señales pequeñas y de poca energía. Estas señales son demasiado reducidas para un procesamiento confiable, y este procesamiento es mucho más fácil si la magnitud de la señal se hace mayor. Las variaciones en la forma de la onda de salida deben ser idénticas a las de la entrada. Cualquier cambio en la forma de onda se considera distorsión y, obviamente, es indeseable.

Un amplificador que mantiene los detalles de la forma de onda de la señal se caracteriza por la relación :

$$V_o(t) = G V_i(t) \quad (4.1)$$

donde :

$V_o(t)$ = Voltaje de salida.

$V_i(t)$ = Voltaje de entrada.

G = Ganancia.

El amplificador de ganancia permite al microprocesador optimizar el escalado de ganancia de los canales analógicos antes de que los datos sean convertidos a cantidades digitales. La tabla siguiente muestra los rangos de entrada de escala de ganancia de la tarjeta .

GANANCIA	RANGO DE ENTRADA	ENTRADA DE ESCALA COMPLETA (12 BITS)
1	+/- 10.0 V.	9.9976 V.
2	+/- 5.0 V.	4.9988 V.
3	+/- 2.5 V.	2.4994 V.
4	+/- 1.25 V.	1.2497 V.

Tabla IV.1 Ganancia del Amplificador.

Circuito de Muestreo y Retención.

Estos circuitos son los que siguen una señal de entrada, la muestrean y luego mantienen el valor instantáneo al recibir la orden de una señal de control lógico. Este tipo de circuitos se utiliza principalmente cuando la señal de entrada varía muy rápido, con respecto al tiempo que debe permanecer constante en la entrada del convertidor A/D.

El principio fundamental del procesamiento de las señales digitales es el muestreo de la señal analógica. Debido a que el procesador digital requiere tiempo internuestro para el procesamiento de datos, las magnitudes de entrada y salida deben registrarse en intervalos de tiempo discreto. En la figura 4.9 se muestra una representación de una señal analógica y en la figura 4.10 su correspondiente señal muestreada. La señal de la figura 4.10 se define solamente en los instantes de muestreo; por lo que ya no se considera una señal continua en el tiempo, sino una señal discreta en el tiempo. Sin embargo, ya que la magnitud de cada muestra puede tener cualquier valor dentro de una región continua, esta señal es aún una señal de tipo analógica.

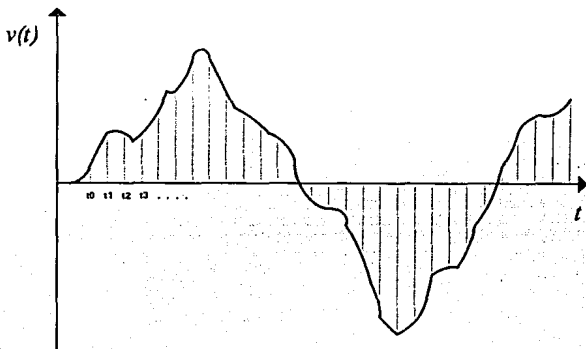


Fig. 4.9 Señal Analógica Continua.

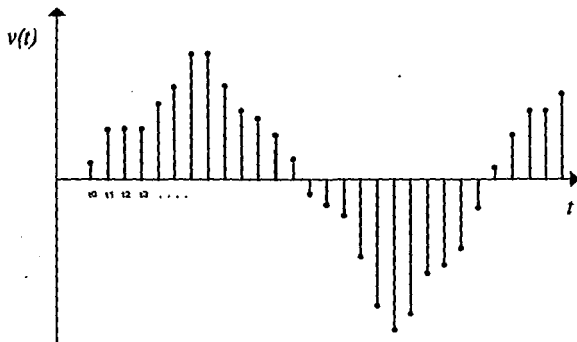


Fig. 4.10 Señal Discreta.

El circuito de muestreo y retención de la tarjeta contiene un capacitor, un interruptor, un amortiguador de entrada y un amortiguador de salida. Para obtener rapidez y exactitud en el muestreo, se configura ya sea como un circuito de retardo RC o un integrador. Durante el muestreo, se carga el capacitor tan rápido como sea posible. Durante la retención, el interruptor está abierto y la carga permanece en el capacitor.

Dos parámetros dinámicos críticos son: el tiempo de adquisición, que es el que se requiere para que cambie el voltaje del capacitor del valor que tenía en retención, al valor final de la señal, a una fracción requerida de la escala completa, y el tiempo de apertura que es el intervalo entre la aplicación de retención y la apertura real del interruptor. Entre los intervalos de muestreo, esto es, durante los intervalos de retención, los niveles de voltaje en el capacitor representan a las muestras de señal. Cada uno de estos niveles de voltaje se aplica a la entrada de un convertidor A/D que proporciona un número binario de N bits proporcional al valor de la muestra de la señal. Si se muestrea una señal a un ritmo demasiado lento y se reconstruye a continuación, se puede producir una distorsión debido a la interferencia de colas espectrales (aliasing). Esto consiste en la creación de señales en otras frecuencias con el mismo patrón de muestreo. Para evitar la interferencia de colas espectrales, la velocidad de muestreo tiene que ser de más de dos veces la frecuencia más alta

requerida. Para propósitos de protección, la frecuencia de muestreo debe ser de varios cientos de Hz, variando de 600 a 2400 Hz, por ejemplo.

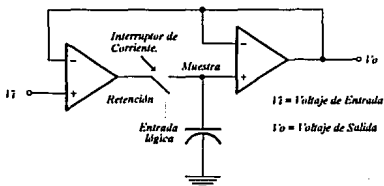


Fig. 4.11 Circuito de Muestreo y Retención.

Convertidor Analógico / Digital.

Una vez realizado el muestreo, el convertidor A/D tomará este nivel de la señal y lo convertirá en información digital o binaria, a este proceso se le conoce como digitalización.

En adquisición de datos y aplicaciones de protección, existen muchos factores que influyen en la exactitud de los datos obtenidos y en el resultado computacional que se tenga. Algunos de estos factores son la calidad de los transductores, el tamaño de los convertidores A/D y el desarrollo computacional que se utilice.

Dentro de las características principales del proceso de conversión A/D se tienen las siguientes:

Resolución : Está definida por el número de bits que el convertidor A/D usa para representar a la señal analógica.

Rango : Se refiere a los niveles de voltaje máximo y mínimo que el convertidor puede cuantificar.

La conversión A/D debe ofrecer suficiente precisión (número de bits), velocidad y exactitud para la aplicación requerida. Los convertidores de 8 a 16

bits se emplean en diseños de protección. Los convertidores de 8 bits dan suficiente precisión para aplicaciones de relevadores de sobrecorriente. Un convertidor de 12 bits da amplio rango para todas las aplicaciones de protección. Los convertidores de 16 bits son demasiado caros, pero han sido empleados en sistemas donde se necesitan rangos dinámicos muy amplios.

Este dispositivo convierte la entrada analógica en información digital con la finalidad de que puedan ser aceptados por el microprocesador, tiene una resolución de 12 bits, es decir que puede tomar 4096 estados diferentes.

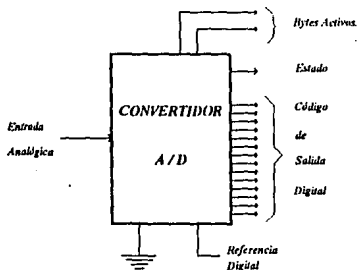


Fig. 4.12 Convertidor Analógico / Digital Típico.

Microprocesador.

El microprocesador es un circuito combinatorial y secuencial que interactúa con otros dispositivos para formar en conjunto un sistema digital.

El microprocesador es el cerebro del sistema, el cual se encarga de ejecutar la instrucción del programa contenido en memoria, leer información del exterior a través de los puertos de entrada, enviar datos al exterior por medio de los puertos de salida, además de almacenar en memoria resultados de las operaciones indicadas en el programa.

Este dispositivo está compuesto por una unidad de control (se encarga de coordinar el funcionamiento del dispositivo), una unidad aritmética-lógica (su función es efectuar todas las operaciones requeridas), una unidad de memoria (memoria RAM para los registros de trabajo y memoria ROM o memoria alambrada para las microinstrucciones) y una unidad de entrada-salida (se encarga de efectuar la comunicación con los dispositivos externos al microprocesador).

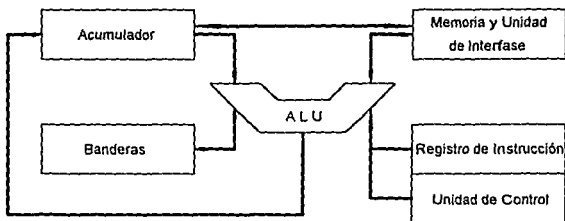


Fig. 4.13 Arquitectura General de un Microprocesador.

Cuando se encuentra en funcionamiento, el microprocesador se direcciona obteniendo la primera instrucción de su memoria almacenándola en el registro, ejecutándola posteriormente la unidad lógica aritmética. Cuando las instrucciones se completan, el contador del programa da la siguiente dirección y continúa el proceso.

El uso del microprocesador es principalmente en sistemas de propósito general, ya que sólo tiene elementos básicos para procesar información y, para realizar alguna función en particular. Se le conectan dispositivos que realicen funciones necesarias; tales como: contadores, temporizadores, puertos de entrada/salida en serie o paralelo, control de interrupciones, etc.; además de que son capaces de direccionar una gran cantidad de memoria y puertos de entrada/salida, su conjunto de instrucciones es muy amplio. Existen microprocesadores de 4, 8, 16, 32 y 64 bits de longitud de la palabra de datos y de registros, es decir, el tamaño de datos que puede procesar en paralelo.

En este prototipo se emplearon dos computadoras 80386 que poseen un microprocesador de 32 bits, esto es, toda la arquitectura interna, tanto el tamaño de los registros como el bus de datos es de 32 bits. El bus de direcciones está formado por 30 líneas lo que permite un espacio de direccionamiento de memoria de $2^{30} = 1$ gigabyte. Dispone de 8 registros generales de 32 bits que pueden utilizarse alternativamente como registros de instrucciones o como registros de direcciones. Estas computadoras tienen una velocidad de 16 MHz.

Memoria.

Es uno de los componentes fundamentales del microprocesador encargado de almacenar la información. Se compone de múltiples posiciones de almacenamiento para palabras binarias de N bits. Las palabras que componen la memoria siguen posiciones correlativas; cada posición o dirección se identifica con un número.

El tipo de memoria de acceso aleatorio (RAM) que la PC utiliza, es la llamada memoria dinámica, es decir que no puede retener datos más de unas milésimas de segundo. Necesita recibir constantemente impulsos de reloj para tener activa la memoria. Este proceso dispone de un canal de acceso a memoria directa (ADM) para tal finalidad.

Otro tipo de memoria RAM que algunas PC's utilizan es la memoria estática. Es una memoria que funciona como una multitud de interruptores de dos posiciones estabilizándose en una de ellas. No necesita "refresco", ganando velocidad, sin embargo son más caras y ocupan mayor espacio.

Existen otros conjuntos de información importante que por lo general se almacenan en memorias EEPROM. Las computadoras empleadas en el prototipo tienen por lo menos 4 Mega-bytes de memoria RAM.

Reloj.

La tarjeta de adquisición empleada tiene un reloj interno con un oscilador que opera desde un periodo de 2.5 μ seg. hasta 81.9 mseg. en incrementos de 1.25 μ seg. Además, esta tarjeta tiene la opción de poder emplear un reloj externo, lo que permite seleccionar un rango infinito de periodos.

El reloj se emplea para sincronizar el muestreo de las señales en la adquisición de datos. La sincronización del reloj se hace de la siguiente forma:

1. El primer pulso de reloj externo o interno se usa para sincronizar la circuitería del control de la tarjeta con la del reloj.
2. La primera conversión de datos ocurre en la segunda transición del reloj de alto a bajo, después de iniciado el disparo.

El periodo de reloj se ajusta empleando la instrucción de ajuste del periodo interno del reloj (ver sección 5.4).

Disparo.

Todas las instrucciones de la tarjeta son iniciadas mediante un disparo interno o externo. El tipo de disparo interno se genera automáticamente por la tarjeta cuando se inicia la ejecución de alguna instrucción. Algunas instrucciones se ejecutan por medio de un disparo externo, lo que permite operar con precisión la instrucción deseada con una buena sincronización.

En este prototipo se pueden emplear ambos tipos de disparo; disparo interno cuando se desea realizar las conversiones en cualquier instante de tiempo, lo que sería en el campo de la protección real, y disparo externo cuando se sincroniza con alguna señal de generación (empleado en el prototipo), de manera que cuando se inicie la generación de cualquier tipo de señal, se de una señal de disparo al mismo tiempo y se inicie de manera instantánea la adquisición de datos, como se muestra en la siguiente figura:

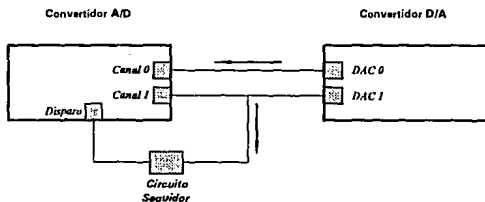


Fig. 4.14 Sistema con Disparo Externo.

Circuito Seguidor.

Se empleó un circuito seguidor para acoplar una carga de baja impedancia a una fuente que tiene impedancia alta interna. Esto se realizó debido a que al conectar en forma paralela la salida del convertidor D/A y al aplicarse el disparo de inicio, se atenúa la señal por la impedancia propia de la tarjeta.

Este circuito tiene una ganancia de la unidad, una impedancia baja de salida, una impedancia alta de entrada y un voltaje de salida en fase con la señal de entrada.

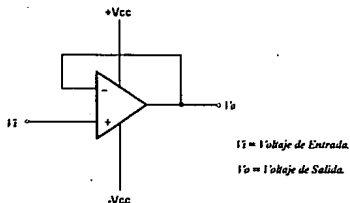


Fig. 4.15 Circuito Seguidor.

Tablilla de Conexiones DT707.

La tablilla de conexiones DT707 es un accesorio que permite que todas las conexiones (A/D, D/A, E/S digital, disparo externo y reloj externo) puedan hacerse con la tarjeta DT2801-A. Esta tablilla, además, proporciona terminales para la mayoría de las tarjetas de adquisición de la serie DT2801. Las conexiones son más fáciles de hacerse o intercambiarse que si se tuvieran los terminales soldados. La función de cada borne está indicada directamente en la misma tablilla de conexiones. En el apéndice B se encuentran sus especificaciones y las conexiones empleadas en el prototipo.

4.4 MÓDULO DE CÁLCULO Y DE RESULTADOS.

En los siguientes capítulos se presenta este módulo en donde se realiza el procesamiento de señales mediante : algoritmos de filtrado digital, algoritmos de cálculo de impedancia transitoria de falla, y algoritmos de determinación de la localización de la falla, además de los resultados obtenidos en las pruebas.

**CONSIDERACIONES DE SOFTWARE PARA UN
PROTOTIPO DE SISTEMA DE PROTECCION DE
DISTANCIA**

5.1 INTRODUCCION

En este capítulo se describe una de las etapas finales en el desarrollo del prototipo de sistema digital, dicha etapa consiste en el desarrollo del "software" necesario para que el sistema completo se comunique.

La programación se realizó con el lenguaje de alto nivel BASIC. El lenguaje de alto nivel se usó para escribir los programas de interacción con el usuario, de tal manera que éste tenga la facilidad de definir cómo se va a procesar la información recibida así como el despliegue de los resultados de interés sin tener que ser un experto en electrónica o computación.

Los programas desarrollados en este prototipo, permiten al procesador controlar la salida y la entrada de información en la computadora así como el procesamiento de dicha información.

Para la programación desarrollada se apoyó en algunos programas incluidos en el "software" de la tarjeta, en donde se presentan algunas operaciones básicas de esta.

5.2 MODO DE ACCESO DIRECTO A LA MEMORIA (ADM).

El acceso directo a la memoria o ADM [10] es un procedimiento de entrada - salida especial que tiene el objetivo de acelerar la transferencia de datos. En este tipo de operaciones el microprocesador no interviene directamente en la transferencia; es decir, la transferencia se realiza directamente entre la memoria y los dispositivos periféricos. Con este procedimiento se consiguen transferencias de datos a alta velocidad.

Las señales de control del sistema indicarán cuando el bus de datos y el de direcciones se encuentren libres. En este tipo de transferencia de datos se requiere la presencia de una interfaz específica del controlador de procesos de ADM. El chip de interfaz recibe el nombre de controlador de ADM, dispone de una memoria de 344 bits que se utiliza como almacén provisional de los datos que están en proceso.

El controlador de ADM dispone de 7 canales distintos. Uno de ellos se utiliza para las unidades de disquetes, otro se encuentra a disposición del disco duro. Existe otro canal que está dedicado con carácter permanente al "refresco" de la memoria (memoria dinámica), que no es capaz de retener los datos por un tiempo superior a unas pocas milésimas de segundo y necesita el aporte continuado de impulsos de reloj. A esto se le conoce como "refresco" de la memoria. Cuando un canal trabaja a su máxima capacidad se dispone de una línea más para la transferencia. El resto de los canales quedan a disposición de los periféricos.

5.2.1 USO DEL ADM CON BASIC.

El acceso a la memoria no puede usarse directamente con BASIC, pero puede accederse empleando los comandos PEEK y POKE para desarrollar lectura y salida de datos que se encuentran en la memoria. La ventaja de este método es que no requiere conocimiento de lenguaje ensamblador, ni de la estructura interna del BASIC para poder acceder datos a la memoria.

El comando POKE se empleó en el módulo de generación de transitorios, mientras que el comando PEEK en el módulo de adquisición de datos para tomar los datos de la memoria.

Estos comandos permiten el control directo de posiciones de memoria con la ayuda de un programa. Con estas posiciones se pueden realizar un gran número de aplicaciones, entre las que se pueden destacar : el control de dispositivos externos a la computadora, paso a subrutinas en lenguaje de máquina, control de sonidos, etc. POKE se utiliza para almacenar valores enteros desde 0 a 255 (en decimal) en posiciones de memoria específicas. La función PEEK se utiliza para examinar el contenido de una posición o dirección específica en la memoria de la computadora.

El comando DEF SEG se usa para ajustar las direcciones del segmento de la memoria actual. Es muy importante el empleo de este comando, porque de otra manera la dirección PEEK o POKE serían referenciados a la dirección base de la zona de trabajo del BASIC, lo cual no tiene relación con el "hardware" direccionado empleado por el controlador ADM de la computadora.

La función más importante del ADM es decidir qué parte de la memoria se usará como un "buffer" ADM. Después de esto, dicha memoria podrá ser accesada fácilmente desde BASIC. El controlador ADM de la PC puede programarse para usar esta parte de memoria como transferencia de ADM, una orden a la tarjeta hará la petición de ADM, que activará el controlador ADM.

La memoria escogida como buffer de ADM debe ser memoria que no emplee el sistema operativo o el BASIC. El sistema operativo usa aproximadamente los primeros 10 Kbytes de memoria, el BASIC cerca de 13 Kbytes y el espacio de trabajo del BASIC es de aproximadamente 64 Kbytes.

5.2.2 PARAMETROS DEL ADM.

El controlador ADM tiene tres parámetros que afectan el funcionamiento de la memoria :

- ◆ Página de memoria de ADM.
- ◆ Dirección base de ADM.
- ◆ Contador de ADM.

Página de memoria de ADM.

El controlador de ADM de la PC maneja un máximo de 16 líneas de dirección. Estas líneas pueden emplearse para acceder arriba de 64 Kbytes de memoria de acceso aleatorio (RAM). Una página de memoria del ADM es un bloque de 64 Kbytes de memoria RAM. Especificando la página de memoria, se determina qué bloque de 64 Kbytes de memoria RAM puede acceder el controlador. El valor de la página de memoria de ADM determina los 4 bits más significativos de las direcciones de memoria del ADM.

Dirección base de ADM.

La dirección base de ADM es la dirección más baja de memoria en la página de memoria de 64 Kbytes, esta se leerá desde una transferencia de lectura de ADM o codificada en una escritura de transferencia de ADM. Esta dirección base determina los 16 bits menos significativos de la dirección usada por la primera transferencia de ADM.

Contador de ADM.

Este contador representa el número total de transferencias de bytes de ADM que suceden en una operación específica de ADM. Un conteo de cero especifica un byte sencillo; por lo tanto, el conteo del byte es siempre uno menor que el número total de bytes requeridos para la transferencia.

5.3 REGISTROS DE LA TARJETA.

Todas las funciones de la tarjeta se controlan y monitorean escribiendo instrucciones, parámetros de las instrucciones y datos para los registros en la tarjeta o leyendo el estado y datos de la tarjeta desde estos registros. La tarjeta contiene cuatro registros de 8 bits que se describen a continuación :

Registro de Instrucciones.

La operación y control de la tarjeta se hará por medio de un byte enviado por la computadora al registro de instrucciones.

Registro de Estado.

Refleja el estado en que se encuentra la tarjeta. Los bits de este registro se emplean como banderas de estado e indican :

- Si ha ocurrido un error.
- Si una instrucción se ha completado.
- Si el último byte alimentado a la tarjeta se grabó en el registro de datos interno o en el registro de instrucciones.

Registro de Entrada de Datos.

Este es un registro de solo escritura, localizado en la dirección base de la tarjeta. Recibe datos de la computadora y desarrolla una conversión D/A o una operación digital de salida. Además recibe parámetros de comandos como parte de la secuencia de operación de un número de instrucciones.

Registro de Salida de Datos.

Este es un registro de solo lectura localizado en la dirección base de la tarjeta. Estos datos se leen con la computadora a través de la tarjeta como resultado de una conversión A/D o una operación de entrada digital. Los dos registros de datos tienen funciones idénticas de bits.

5.4 INSTRUCCIONES DE LA TARJETA.

La tarjeta se controla con 16 instrucciones que especifican su operación realizando las siguientes funciones :

Instrucción	Código de Operación
• Reajuste.	0 0 0 0
• Limpieza de error.	0 0 0 1
• Lectura del registro de error.	0 0 1 0
• Ajuste del periodo interno del reloj.	0 0 1 1
• Paro de la operación.	1 1 1 1
• Prueba	1 0 1 1
• Ajuste del puerto digital de entrada.	0 1 0 0
• Ajuste del puerto digital de salida.	0 1 0 1
• Lectura inmediata de la entrada digital.	0 1 1 0
• Escritura inmediata de la salida digital.	0 1 1 1

Instrucción	Código de Operación
• Escritura inmediata D/A.	1 0 0 0
• Ajuste de los parámetros D/A.	1 0 0 1
• Escritura D/A.	1 0 1 0
• Lectura inmediata A/D.	1 1 0 0
• Ajuste de los parámetros A/D.	1 1 0 1
• Lectura A/D.	1 1 1 0

Estas instrucciones deben escribirse en el registro de instrucciones de la tarjeta. Cada instrucción consiste de un byte sencillo, que puede usarse en un programa en BASIC escrito para la PC como un número decimal, hexadecimal u octal.

Cada byte se divide en dos secciones de cuatro bits (ver figura 5.1). Los cuatro bits menos significativos son el código de operación (OPCODE) que especifica una instrucción particular. Los bits más significativos son modificadores de instrucciones, y permiten que algunas instrucciones operen con disparo externo, reloj externo, en modo continuo o en modo de acceso directo a memoria (ADM). Hay que observar que no todos los modificadores se emplean con todas las instrucciones.

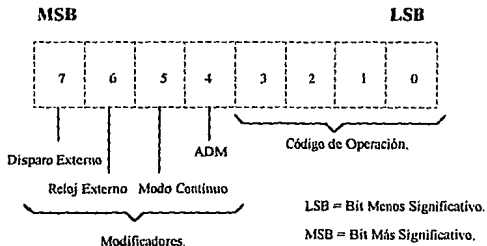


Fig. 5.1 Funciones de los Bits en el Registro de Instrucciones.

5.5 DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA GTFA DE GENERACION DE TRANSITORIOS.

El objetivo de este programa fué generar una falla de tipo trifásica empleando para esto, el lenguaje BASIC en una de las computadoras del prototipo.

Primeramente se creó un archivo de datos que corresponde a los resultados obtenidos de una falla trifásica en una línea de transmisión. Se introdujeron un total de 160 datos de falla para cada señal de salida (canales 0 y 1) de cada convertidor, siendo un total de 320 datos almacenados para cada fase. Estos datos se introdujeron al programa con su respectivo valor en magnitud y el mismo programa transforma su magnitud a su correspondiente valor en binario, de manera que la tarjeta pueda leer los datos y posteriormente convertirlos a su forma analógica.

Los datos digitales se toman del archivo de datos y se almacenan en el registro de salida de datos de la tarjeta para posteriormente convertirlos en señales analógicas.

En este programa se ajustó también la frecuencia del reloj con la instrucción "ajuste del periodo interno del reloj" de la misma tarjeta, de manera que se tuviese una señal de salida con una frecuencia de 60 Hz. El programa además, está en modo continuo es decir, que la generación de los 320 datos de falla es repetitiva.

A continuación se tiene el diagrama de bloques del programa de generación de transitorios :

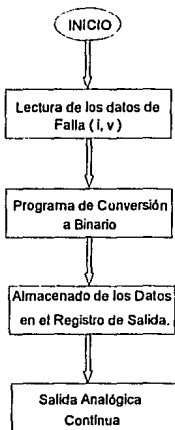


Fig. 5.2 Diagrama de Bloques del Programa GTFA de Generación de Transitorios.

5.6 DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA ADFa DE ADQUISICION, DE CALCULO Y DE RESULTADOS.

Una vez que se tienen montadas las tarjetas en cada una de las computadoras que forman al sistema y están interconectadas entre sí por medio de las tablillas de conexiones, es necesario que todas ellas operen de manera coordinada, lo cual se logra a través del programa de control del sistema.

Para controlar el sistema, se desarrolló el programa ADFa, escrito también en lenguaje BASIC y programado en la segunda computadora personal. Este programa toma los datos muestreados, los interpreta, los procesa y por último

Una vez que se tienen los datos almacenados en la computadora personal, es conveniente contar con los elementos para interpretarlos, ya que el sistema sólo genera datos en binario contenidos en su memoria. El programa extrae los valores de las señales del mapa de memoria por medio de la función PEEK, para después convertirlos a su forma decimal, de tal manera que puedan ser procesados por los algoritmos de cálculo de impedancia.

El programa **ADFA** se dividió en las siguientes etapas:

- **Etapas de Configuración de la Tarjeta.**
- **Etapas de Procesamiento .**
- **Etapas de Resultados.**

ETAPA DE CONFIGURACION DE LA TARJETA

En esta etapa se establecen todos los parámetros iniciales de operación del sistema de adquisición. A continuación se describen los pasos para configurar la tarjeta de adquisición de datos:

1.- Canales de Entrada.

En total existen 16 entradas para canales de tipo sencillo ó 8 de tipo diferencial. El programa **ADFA** permite seleccionar el número de canales que se deseen emplear en el sistema (para el prototipo se emplearon sólo los canales 0 y 1).

2.- Muestreo

El periodo del reloj interno de la tarjeta se ajustó de tal manera que se pudiera elegir cualquier índice de muestreo requerido. Para este prototipo se emplearon los siguientes índices de muestreo :

- De 1200 Hz (20 muestras / ciclo / canal), Algoritmo de Ecuación Diferencial.
- De 720 Hz (12 muestras / ciclo / canal), Algoritmo de Fourier .
- De 960 Hz (16 muestras / ciclo / canal), Algoritmo de Walsh .

3.- Tipo de Señal

El programa también permite seleccionar el tipo de señal que se desee emplear (para el prototipo se empleó el tipo de señal sencilla).

- S - Sencilla
- D - Diferencial

4.- Ganancia

Si se requiere amplificar la señal, el programa permite seleccionar la ganancia deseada (para el prototipo se utilizó la ganancia de 1).

- 1
- 2
- 4
- 8

5.- Canal de Inicio y Canal de Término.

El programa **ADFA** permite seleccionar los canales para la adquisición de los datos. Para este prototipo se seleccionó el canal 0 que corresponde a la corriente y el canal 1 para el voltaje. En una aplicación real se tendrían 7 canales de entrada para la protección de la línea de transmisión.

- De 0 a 15 (Tipo sencillo).
- De 0 a 7 (Tipo diferencial).

6.- Número de Conversiones

Posteriormente el programa pide el número de conversiones que se deseen hacer. El número de conversiones depende del algoritmo que se esté empleando, debido al índice de muestreo que tienen.

- 160 Conversiones (Algoritmo de Ecuación Diferencial).
- 96 Conversiones (Algoritmo de Fourier).
- 128 Conversiones (Algoritmo de Walsh).

7.- Disparo

Finalmente se hace la petición de disparo de inicio. Esto se realiza cuando se desea sincronizar la operación de la tarjeta de adquisición con alguna señal externa, de manera que se inicie la conversión de los datos en el instante del disparo. Si no se desea sincronizar la adquisición, la conversión inicia cuando uno se lo indica.

ETAPA DE PROCESAMIENTO.

Después de que se haya dado el disparo de inicio (interno o externo), el programa inicia la obtención de los datos y su almacenamiento en variables dimensionadas.

- Canal 0 : COR (n)
- Canal 1 : VOL (n)

donde :

n = Número de conversiones.

Posteriormente, se emplea el algoritmo de filtrado digital si así lo requiere el algoritmo de protección (ecuación diferencial), este filtrado es para limitar o reducir los efectos de ruido y señales no deseadas (descrito en la sección 3.3.1). Los datos filtrados se almacenan en otras variables dimensionadas :

- Canal 0 : I(1), I(2), ..., I(n)
- Canal 1 : V(1), V(2), ..., V(n)

Después de realizado lo anterior, se emplea uno de los tres algoritmos de protección seleccionados (descritos en la sección 3.3). Los valores de resistencia y reactancia se almacenan también en variables dimensionadas :

- RL(1), RL(2), ..., RL(n)
- XL(1), XL(2), ..., XL(n)

- XL(1), XL(2), ..., XL(n)

Posteriormente, se utiliza el criterio de disparo [3] a los resultados obtenidos, en donde se tiene una zona de protección ya especificada en el mismo programa y si existe un tercer valor cuya resistencia y reactancia se encuentren dentro de la misma zona de protección y en forma continua, disparará el relevador. La simulación del disparo se realiza por medio de un sonido de alarma (beep) producido por la computadora.

Al término del programa se hace la petición al usuario acerca del nombre del archivo al que se le va a asignar los valores de impedancia obtenidos durante la ejecución del programa. Esto es con la finalidad de ser analizados posteriormente y observar el comportamiento que tuvieron durante las pruebas.

A continuación se presenta el diagrama de flujo que muestra la secuencia del programa :

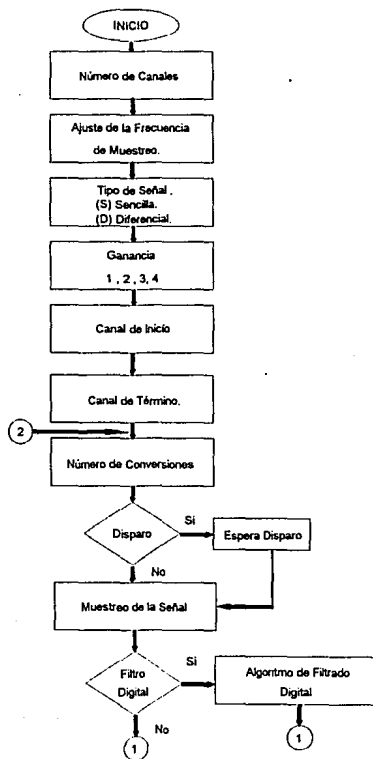


Fig. 5.3 Diagrama de Bloques del Programa ADFP de Protección.

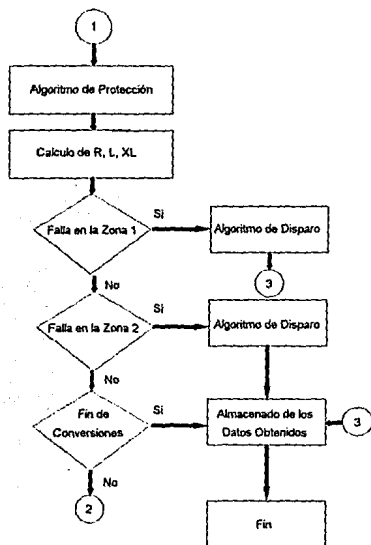


Fig. 5.3 Continuación.

ETAPA DE RESULTADOS

En esta etapa se obtuvieron los valores de impedancia característica de falla. En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas al prototipo.

PRUEBAS AL PROTOTIPO

6.1 SISTEMA DE POTENCIA UTILIZADO.

Para probar la respuesta del relevador digital de distancia a una falla, fué necesario suministrar al relevador una secuencia de muestras de voltajes y corrientes provenientes del módulo de generación. Para tal objetivo se seleccionaron datos de un sistema de Extra Alta Tensión, ya que en estos sistemas es donde se presentan transitorios de alta frecuencia asociados a la capacitancia de cargado de la línea cuando ocurre una falla. En la figura 6.1 se muestra el sistema de potencia seleccionado.

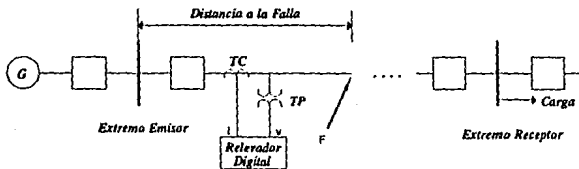


Fig. 6.1 Sistema de Potencia Seleccionado.

Para simplificar las derivaciones de los algoritmos, todos los transformadores se consideraron con una relación unitaria. El índice de muestreo se seleccionó lo suficientemente alto para asegurar representaciones digitales exactas de las señales analógicas originales.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se seleccionó una línea de transmisión de 345 KV, 161 Kilómetros y 60 Hz para la evaluación de los

algoritmos seleccionados. A continuación se dan las características del sistema de potencia.

Fuente

Generador con capacidad de 10 000 MVA de cortocircuito sin pérdidas.

Resistencia del generador (R_g) ≈ 0

Inductancia del generador (L_g) = 0.318 H. Referido a 345 KV, correspondiente a una impedancia interna de $12 \Omega/\text{fase}$.

Línea de Transmisión

Conductores de fase : 2 x 795 MCM ASCR 26/7 Drake por fase; separación de conductores agrupados, 40.64 cm; separación horizontal entre fases, 10.06 m; altura sobre el terreno en la torre, 21.95 m; flecha a medio claro, 13.62 m.

Hilos de guarda : 2 x 7/16" Aluminoweld; separación simétrica, 13.26 m; altura en la torre, 29.12 m; flecha a medio claro, 8.02 m.

Conductividad del terreno: 0.01 mhos/m.

Permeabilidad del vacío: $4\pi \times 10^7$ H/m.

Constante dieléctrica del vacío: 8.85×10^{-12} F/m.

Carga

Se consideró una carga máxima de 600 MW con un factor de potencia (F_p) de la unidad.

Parámetros de la línea

Empleando los datos de la línea y el método de cálculo de parámetros de [11] para 161 kilómetros de línea a 60 Hz, se obtuvieron los siguientes valores:

$$Z_1 = 5.948 + j63.341 \Omega$$

$$Z_0 = 56.95 + j178.47 \Omega$$

$$Y_1 = j679.78 \mu s$$

$$Y_0 = j480.58 \mu s$$

Donde Z_1 y Y_1 son cantidades de secuencia positiva y Z_0 y Y_0 cantidades de secuencia cero (Y es la admitancia paralelo de la línea). Se consideró además que la línea tiene transposición completa.

De los parámetros de la línea de transmisión, al tener una carga de 200Ω al final de la línea, la impedancia aparente al es de $210.9 + j35.3 \Omega$. La aplicación de un cortocircuito al final de la línea provoca que la impedancia aparente vista por el relevador tenga una transición de una impedancia de prefalla de $210.9 + j35.3 \Omega$ a una impedancia de cortocircuito de $5.95 + j63.34 \Omega$.

6.2 CARACTERISTICA DE OPERACION.

La característica de operación empleada por el relevador fué la zona poligonal (figura 2.2). El alcance de la primera zona de protección [12], se seleccionó del 85 por ciento de la línea de 161 km, lo cual da un valor de 53.84Ω ; mientras que el alcance de la segunda zona, se seleccionó aproximadamente del 118 por ciento de la línea, lo que da un valor de 74.52Ω .

El relevador operará cuando la trayectoria de la impedancia aparente intersekte la característica de operación del relevador, y el tiempo de su operación será aquel desde que inicie la falla hasta el instante en que permanezca en tres ocasiones y en la misma zona de protección. Hay que hacer notar que si la falla se encuentra en la zona 2, habrá falso disparo del relevador si la impedancia aparente vista por el relevador permanece en tres ocasiones más en la zona 1 antes de entrar a la zona 2.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

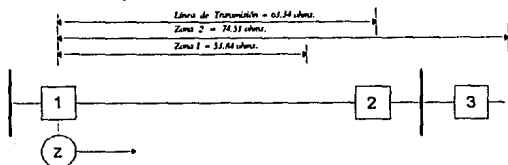


Fig. 6.2 Localización del Relevador Z, Alcance de las Zonas 1 y 2 en la Línea de Transmisión Seleccionada.

6.3 PRUEBAS REALIZADAS.

Para observar la respuesta del prototipo se emplearon los tres algoritmos de medición digital de impedancia : Ecuación Diferencial, Análisis de Fourier y Análisis de Walsh (descritos en la sección 3.3). La falla aplicada fué un cortocircuito trifásico en el extremo remoto de la línea de transmisión seleccionada.

La tarjeta de adquisición de datos sólo proporciona muestreo secuencial. Debido a la longitud del multiplexor, se ideó un método para simular un muestreo simultáneo, éste consistió en introducir la señal de corriente y voltaje a la vez en un mismo canal. Para esto se aplicó la señal de corriente al canal 0 y se almacenaron los datos en un archivo, posteriormente se aplicó la señal de voltaje al mismo canal realizándose los mismos pasos. Los datos almacenados se aplicaron al programa de protección para obtener los resultados mostrados.

Para tomar la decisión de operación del relevador [3] es necesario determinar si el cortocircuito está dentro de su alcance. El criterio que se tomó para la operación del relevador fué que habrá un disparo cuando la trayectoria de la impedancia aparente de falla permanezca en tres ocasiones y en forma continua en la misma zona de protección.

Una de las maneras de calcular la distancia a la falla, se logra determinando la longitud de la sección de línea comprendida entre el punto de ubicación del relevador y el punto de falla. Para ello es conveniente calcular la reactancia

inductiva o la inductancia de esa sección de línea, ya que estos parámetros son poco afectados por la resistencia de falla. Se puede lograr que la reactancia medida sea proporcional a la distancia de la línea comprendida entre el relevador y la falla. De esta manera, la distancia a la falla se determinó obteniendo un promedio de las reactancias obtenidas en cada unidad de protección para finalmente determinar la distancia total a la falla. Existen factores que afectan la medición de la distancia correcta a la falla (la resistencia de falla es solamente uno de ellos), y el relevador determina en realidad una especie de distancia aparente, resultante de la medición que puede hacer a partir de la información de un solo extremo de la línea protegida.

Para el algoritmo de filtrado digital, las constantes se determinan a partir de un filtro paso-bajas butterworth de tercer orden con frecuencia de corte de 120 Hz, empleando el método de transformación bilineal [13] y sus valores son los siguientes:

$$\begin{array}{llll}
 A_0 = 0.0181 & A_1 = 0.0543 & A_2 = 0.0543 & A_3 = 0.0181 \\
 B_1 = -1.760 & B_2 = 1.1829 & B_3 = -0.278 &
 \end{array}$$

Para determinar el tiempo total de operación del relevador se deben tener las siguientes consideraciones: Primero, el retraso de tiempo que produce el filtro empleado (si así lo requiere el algoritmo). Segundo, el tiempo consumido por el cálculo de la impedancia aparente empleado por el algoritmo, y por último el tiempo requerido para la comparación de las muestras con la zona de protección para el disparo del relevador.

Las pruebas se dividieron en cuatro secciones: La primera sección muestra las señales trifásicas (prefalla y posfalla) de corriente y voltaje suministradas por el módulo de generación de transitorios (figuras 6.3 y 6.4).

La segunda sección presenta las tablas que muestran los resultados obtenidos durante las pruebas al prototipo con cada uno de los algoritmos analizados (tablas VI.1–VI.6). En estas tablas, la muestra 0 representa la muestra de prefalla (P) y la muestra sombreada es la tercer muestra consecutiva dentro de la misma zona de protección que manda la señal de disparo del relevador; Además, para cada tabla se muestra el tiempo de operación del relevador, la zona de disparo y la distancia de la falla obtenida.

La tercer sección muestra la comparación de las trayectorias de impedancia aparente (fig. 6.5–6.7 y 6.11–6.13), obtenidas con los tres algoritmos evaluados y la dirección que siguen desde la muestra de prefalla (P), hacia las zonas de protección.

Finalmente la última sección presenta el comportamiento que tuvo la resistencia y reactancia durante el tiempo de posfalla y la estabilidad que se presenta en cada algoritmo (fig. 6.8–6.10 y 6.14–6.16).

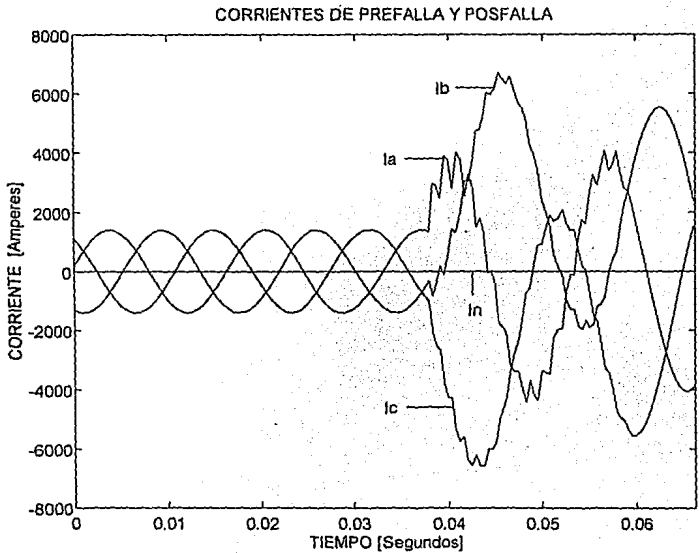


Fig. 6.3 Señales de Corriente de una Falla Trifásica Suministradas al Prototipo.

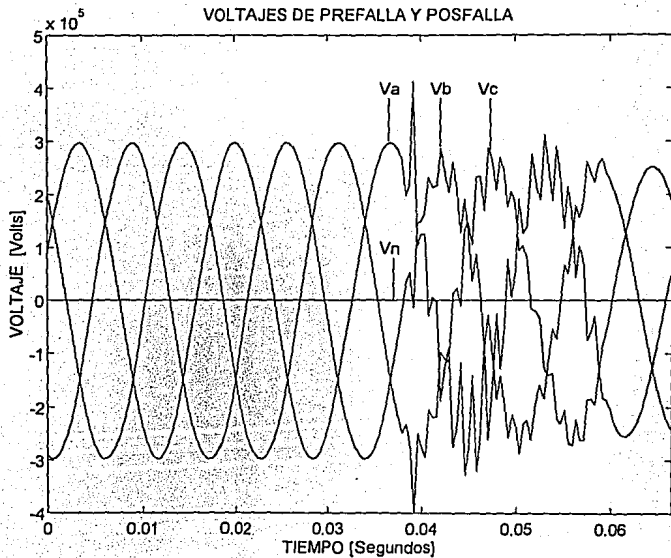


Fig. 6.4 Señales de Voltaje de una Falla Trifásica Suministradas al Prototipo.

Tabla VI.1 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial y Muestreo Secuencial.

ALGORITMO DE MEDICION :	<i>Ecuación Diferencial.</i>
ALGORITMO DE FILTRADO :	<i>Filtro Paso-Bajas Recursivo de Orden 3. Frecuencia de Corte de 120 Hz.</i>
INDICE DE MUESTREO :	<i>1200 Hz (20 Muestras por Ciclo).</i>

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	201.1163	67.9518	199.6569	68.6610	200.7692	70.1840
1	193.2671	71.1329	201.5349	87.5804	197.6181	67.5861
2	146.0400	109.1941	215.0206	121.3616	176.0042	59.2828
3	-50.4439	344.5692	212.9318	118.4590	124.1502	57.3011
4	-681.0403	1235.4901	170.0437	84.6751	51.1091	75.7110
5	-414.2924	836.6536	104.8840	63.0550	-12.7024	106.8518
6	-75.4365	284.6605	41.7782	64.2666	-30.8116	119.3656
7	-9.1543	145.9305	3.2833	75.3273	-22.3538	111.6508
8	2.3507	101.8978	-10.6828	82.5742	-12.8540	100.1559
9	2.2710	80.4970	-10.2158	82.2205	-5.6395	88.1383
10	-0.7824	71.2305	-5.6605	77.4415	-2.0056	79.0090
11	-3.2583	68.0898	-2.7678	73.1804	-0.6341	72.4047
12	-5.4479	66.7323	-0.8710	68.9997	-0.5164	67.1624
13	-4.0803	67.0383	-0.1802	66.3119	-0.8985	64.9028

14	-3.9818	67.0282	-0.1212	65.5031	-1.5448	63.2157
15	-9.7818	69.5764	-0.3340	63.5986	-2.8112	61.2496
16	-11.3711	70.9635	-0.7763	62.1815	-3.2814	60.7823
17	-8.1369	65.6618	-0.9454	61.8734	-4.3281	60.1355
18	-7.3549	62.1846	-2.0465	60.5898	-6.7522	59.3772
19	-7.3474	62.2463	-3.3709	59.5989	-8.6074	59.3517
20	-7.4490	62.0386	-4.8341	58.9762	-11.5456	60.3937
21	-6.0800	63.4252	-8.1308	58.5425	-13.1360	62.0281
22	-4.2638	64.3597	-11.2033	59.1472	-12.8550	60.4916
23	-4.3966	64.3382	-13.8607	61.0052	-12.9402	60.3287
24	-3.2838	64.1608	-15.4760	64.6971	-8.9925	62.6466
25	-3.2796	64.1586	-14.7399	67.8859	-3.9117	63.2962
26	-4.4043	65.3452	-12.4841	70.0598	-0.9442	62.7290
27	-4.3048	65.1307	-8.9628	71.2294	0.6197	61.9424
28	-4.2661	64.7876	-5.9453	71.1453	0.5321	62.0202
29	-4.1514	65.3257	-4.0303	70.5118	-0.2523	63.1768
30	-4.0529	65.4933	-2.7884	69.7013	-0.6801	64.3221
31	-3.9697	65.5661	-1.9766	68.8365	-0.7605	64.9495

DISPARO DEL RELEVADOR : *0,75 Ciclos. Unidad A.*
 ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*
 DISTANCIA DE LA FALLA : *162.718 Km (101.06%).*

Tabla VI.2 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Fourier y Muestreo Secuencial.

ALGORITMO DE MEDICION : *Fourier.*
INDICE DE MUESTREO : *720 Hz (12 Muestras por Ciclo).*

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	190.6446	91.2367	191.6701	92.7567	192.1239	63.4226
1	187.6197	81.7782	188.5728	101.2863	185.2487	61.1125
2	166.5215	62.3297	173.6865	84.0154	158.4309	61.1177
3	123.7803	51.6360	133.7978	61.2198	118.6041	54.4158
4	83.3725	53.8771	93.6376	56.1209	81.6450	58.9679
5	54.0384	59.0810	61.9905	60.0036	52.3895	65.0900
6	32.3837	62.0767	37.2513	63.9866	31.8285	68.8039
7	16.5725	62.3709	20.3814	65.7500	16.9420	71.8618
8	5.3795	61.9950	8.4239	66.8607	6.0405	74.7782
9	-2.1967	61.5987	0.1998	67.4624	0.6933	73.6393
10	-6.2675	60.4406	-3.5156	67.4232	-1.8466	73.8262
11	-7.7265	58.2076	-5.9452	64.9845	-4.8613	70.4765
12	-9.1231	55.4514	-8.7328	62.6222	-7.2826	67.2368
13	-11.1946	53.9739	-10.3815	61.8343	-10.1196	65.5752
14	-13.2418	53.7756	-12.7697	61.6459	-12.5648	64.3525

15	-14.6024	55.0487	-15.6873	61.9242	-15.5496	63.3152
16	-14.8176	57.4929	-18.6258	62.4344	-17.9060	64.2223
17	-14.4469	59.7459	-19.7654	63.9303	-17.4169	67.4261
18	-14.6207	62.8208	-17.9307	66.8769	-15.8065	69.9325
19	-11.0524	61.6804	-15.7912	68.9755	-13.7173	71.0257
20	-5.1829	52.8504	-10.9621	64.8385	-10.3509	70.4191
21	-0.1083	48.7840	-5.6030	61.4733	-10.6090	66.2314

DISPARO DEL RELEVADOR : *0.833 Ciclos. Unidades A, B y C.*

ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*

DISTANCIA DE LA FALLA : *159.787 Km (99.24%).*

Tabla VI.3 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Walsh y Muestreo Secuencial.

ALGORITMO DE MEDICION : *Walsh.*
 INDICE DE MUESTREO : *960 Hz (16 Muestras por Ciclo).*

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	200.0889	74.7402	200.1097	75.5058	199.5977	63.3871
1	193.1996	69.3453	197.8938	74.9406	179.7764	48.9610
2	163.1920	70.2355	193.6509	79.4723	151.3553	40.6178
3	128.0841	83.5059	194.0345	74.0173	113.6218	42.8306
4	101.9357	97.0931	180.9953	52.5046	85.0149	50.0720
5	80.0573	110.9292	153.9185	38.0128	63.7964	54.4265
6	63.8089	119.4624	119.8539	34.2517	46.1410	58.9595
7	52.4135	119.1146	87.4935	40.6558	31.9038	63.1407
8	49.2732	117.3045	64.5229	47.2050	20.5242	67.0842
9	50.8830	107.8643	47.3077	51.8511	12.7945	70.3574
10	46.6049	93.3475	33.9663	54.9667	7.1915	72.0626
11	38.1009	81.5419	23.5658	56.7873	3.4274	72.2215
12	28.6835	74.3857	15.5342	59.0717	2.0982	70.8887
13	19.7170	71.7492	10.6467	62.0184	2.0572	67.5457
14	12.3361	71.7121	7.7883	63.0515	0.1666	64.2309

15	7.1818	71.1706	5.6448	62.9715	-1.1554	62.3377
16	5.4158	68.3399	3.7279	60.5204	-3.1227	60.8394
17	2.0897	62.7831	-0.4529	58.9111	-4.4537	60.6479
18	-2.5740	60.9929	-3.3965	58.9769	-5.6135	60.1178
19	-4.5841	61.7425	-5.5360	58.6414	-6.8994	61.3365
20	-5.4292	62.0498	-7.6231	58.0373	-8.6060	62.0203
21	-4.6419	61.2097	-9.6092	57.2543	-12.1873	63.9562
22	-5.2011	62.2814	-11.0571	57.7153	-13.2490	66.9498
23	-4.6319	66.9667	-11.5525	59.7437	-12.1597	69.5109
24	-3.0128	67.3229	-12.1713	61.1729	-9.2222	70.1961
25	-3.7296	66.2309	-13.6029	63.4795	-7.3707	69.4521
26	-5.0409	65.3527	-13.5322	66.6750	-4.4504	68.6842
27	-7.2839	65.5146	-12.6384	70.3003	-5.1333	66.5112
28	-5.3848	69.6889	-6.0562	67.9174	-7.1373	70.2958
29	4.1946	71.6327	-5.0265	56.8947	-1.8173	75.0812

DISPARO DEL RELEVADOR : *0.75 Ciclos. Unidad C.*
 ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*
 DISTANCIA DE LA FALLA : *162.952 Km (101.21%).*

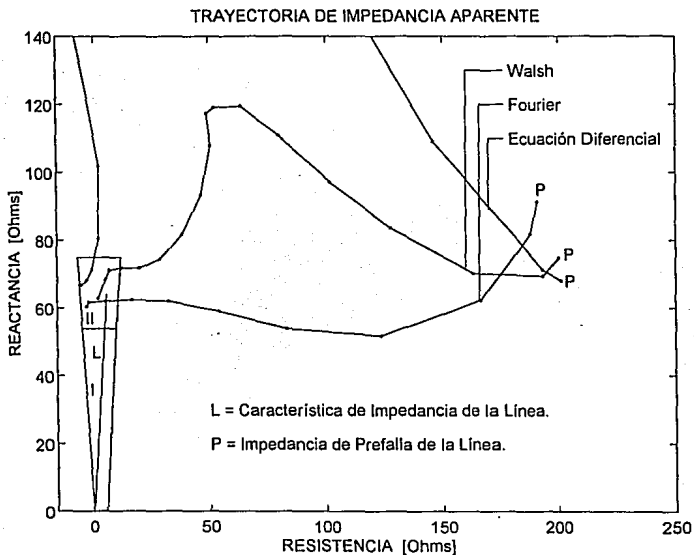


Fig. 6.5 Trayectorias de Impedancia Apparente para la Unidad de Tierra de la Fase A; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.

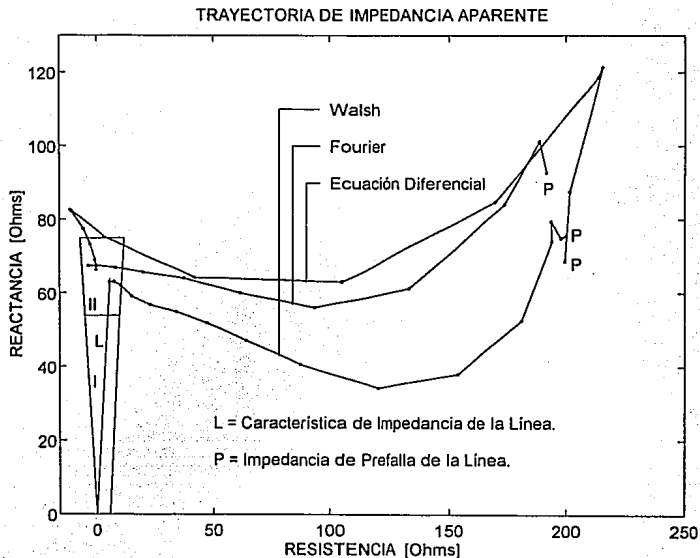


Fig. 6.6 Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase B; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.

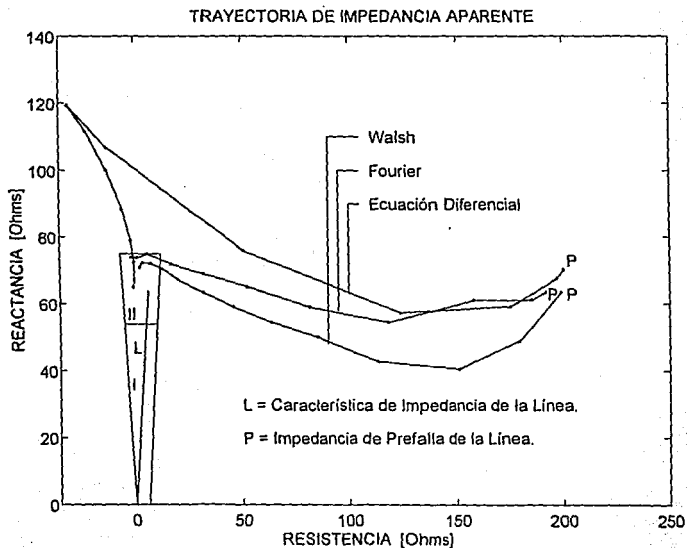


Fig. 6.7 Trayectorias de Impedancia Apparente para la Unidad de Tierra de la Fase C; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Secuencial.

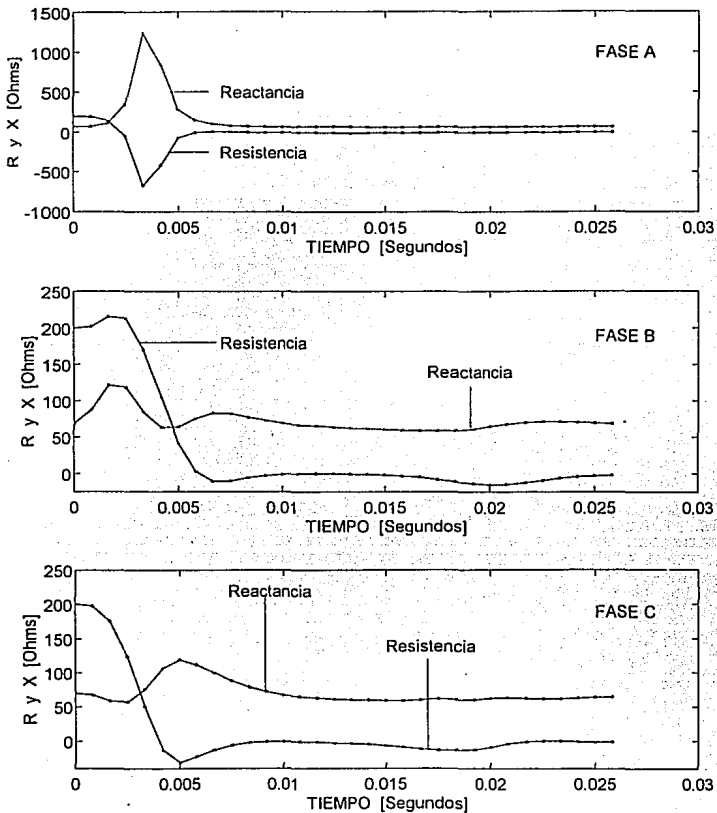


Fig. 6.8 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial con Muestreo Secuencial.

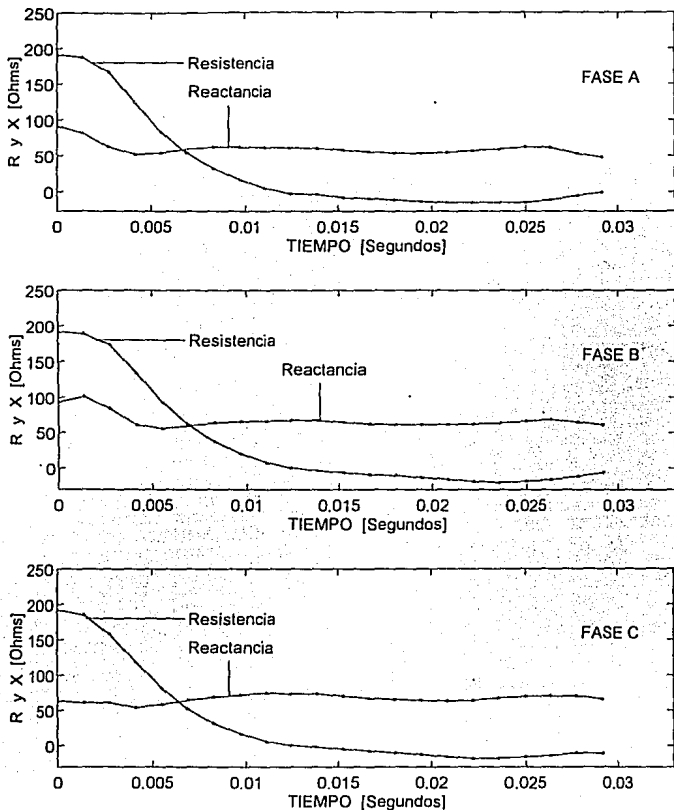


Fig. 6.9 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Fourier con Muestreo Secuencial.

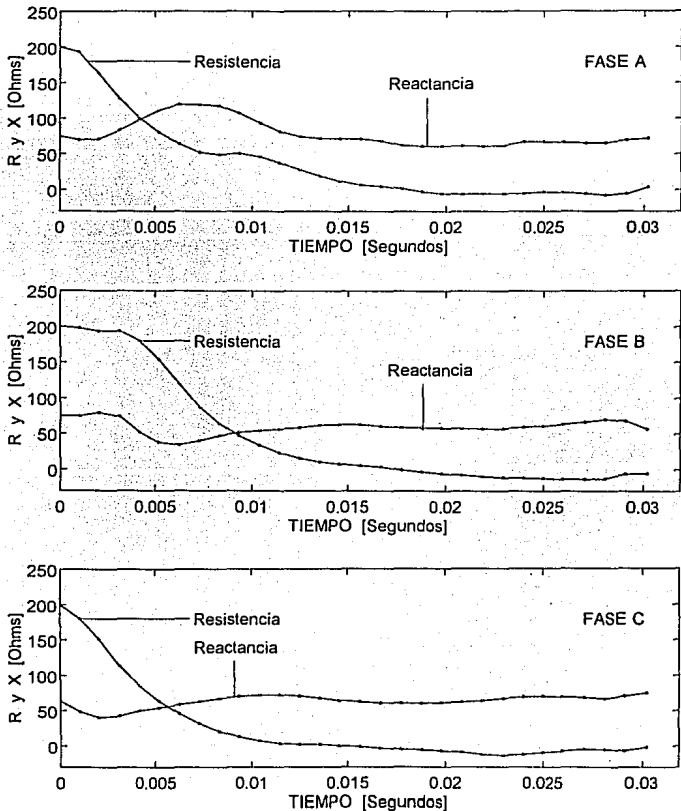


Fig. 6.10 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Walsh con Muestreo Secuencial.

Tabla VI.4 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial y Muestreo Simultáneo.

ALGORITMO DE MEDICIÓN : *Ecuación Diferencial.*
 ALGORITMO DE FILTRADO : *Filtro Paso-Bajas Recursivo de Orden 3.*
Frecuencia de Corte de 120 Hz.
 INDICE DE MUESTREO : *1200 Hz (20 Muestras por Ciclo).*

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	209.5729	34.1966	210.1130	37.6198	201.3315	69.7168
1	205.3008	35.9439	212.5006	53.8132	195.2796	66.1868
2	169.7332	64.7534	224.4186	82.1660	163.6910	59.5997
3	16.5554	248.4222	217.7637	72.9666	97.6682	66.6291
4	-431.5062	879.7216	181.6384	44.2968	21.0185	94.2876
5	-259.0241	622.6366	136.8071	29.2413	-23.7345	119.7570
6	-35.9716	259.8055	85.0790	30.1086	-32.8674	126.8479
7	15.3468	152.2805	41.9219	42.3651	-21.9583	115.6753
8	25.5561	113.0253	18.9170	54.1989	-10.3477	99.6613
9	25.4595	91.9730	8.0583	62.3793	-3.7733	86.6017
10	20.1077	75.7358	5.5289	65.0266	-0.7340	76.5898
11	13.9976	67.9810	5.9761	64.3680	-0.0571	70.7104
12	10.9580	66.0957	5.5618	65.2820	-0.3741	66.3964
13	6.2299	65.0376	5.2514	66.4916	-1.4084	62.6093

14	1.9304	65.4776	5.3226	65.5123	-2.0452	61.3407
15	2.8292	65.0848	5.1527	63.9895	-2.8515	60.3256
16	5.1706	63.0541	5.0033	63.5107	-4.6139	58.8971
17	5.8824	61.8990	5.1545	63.7861	-5.1621	58.6373
18	5.7773	62.3163	5.5429	64.2388	-5.1667	58.6365
19	5.8383	63.4821	6.0319	64.6043	-5.7011	58.7131
20	6.2143	64.5125	6.5484	64.8238	-5.8652	58.8144
21	6.7168	65.1742	6.9082	64.8709	-6.2257	59.5839
22	6.9653	65.3516	7.0137	64.8501	-5.5303	61.9197
23	6.8617	65.3183	6.9893	64.8672	-2.4204	64.3475
24	6.8165	65.3186	6.8556	65.1758	1.5152	65.2566
25	6.8866	65.6758	6.9585	65.6127	4.2976	64.9614
26	6.8585	64.6127	6.8144	65.4744	5.9190	64.2991
27	6.4674	64.5949	6.4088	65.3401	6.5489	63.8266
28	6.6788	64.6401	6.4101	65.3401	6.4241	63.9786
29	6.8151	65.3509	6.2604	65.3897	6.2020	64.4288
30	6.6884	65.3497	6.3022	65.3435	6.0481	65.0712

DISPARO DEL RELEVADOR : *0.70 Ciclos. Unidad B.*

ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*

DISTANCIA DE LA FALLA : *162.223 Km (100.75%).*

Tabla VI.5 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Fourier y Muestreo Simultáneo.

ALGORITMO DE MEDICION : *Fourier.*
 INDICE DE MUESTREO : *720 Hz (12 Muestras por Ciclo).*

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	200.3633	66.7058	207.0937	46.6128	206.6348	38.1515
1	191.3060	64.2657	205.1979	51.8781	196.9444	28.0791
2	162.1402	72.8199	194.8801	42.9414	163.8879	15.8179
3	124.5047	89.1651	152.5514	28.6746	121.5881	20.5287
4	93.8311	106.5737	104.0406	30.6556	88.4767	32.5973
5	75.5955	120.7951	71.8075	38.7624	64.6651	43.8431
6	73.1060	125.2694	51.6632	44.3931	47.6266	51.2460
7	70.6287	114.2462	37.5705	48.4558	35.8193	55.4702
8	57.7450	95.8502	27.7087	51.6035	27.3883	58.1918
9	39.9024	84.9039	21.9625	53.7820	22.7591	59.3298
10	25.2190	81.6987	18.6568	54.0130	20.9415	57.6036
11	16.4844	82.4227	16.3652	52.1823	18.3190	54.4971
12	13.2782	81.9063	14.3204	49.8157	15.5058	52.2725
13	9.5746	77.4386	11.8285	48.9503	13.2104	51.1407
14	4.8781	73.6010	9.8349	49.2207	11.5551	51.1233

15	1.9434	74.4578	8.4900	50.8864	10.1195	51.8880
16	0.9583	74.8371	7.2835	53.5110	8.3984	53.2045
17	1.1555	72.2098	6.0744	55.8211	7.4377	55.8380
18	-0.2648	68.8259	4.5766	58.3863	6.9974	58.9908
19	-1.2744	66.9815	5.0056	62.0634	7.4847	58.2208
20	-2.8655	67.3864	10.0059	58.9578	10.3452	63.5428

DISPARO DEL RELEVADOR : *1.333 Ciclos. Unidad A.*

ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*

DISTANCIA DE LA FALLA : *163.844 Km (101.76%).*

Tabla VI.6 Impedancias Obtenidas Empleando el Algoritmo de Walsh y Muestreo Simultáneo.

ALGORITMO DE MEDICION :

Walsh.

INDICE DE MUESTREO :

960 Hz (16 Muestras por Ciclo).

Muestra	Unidad de Tierra Fase A		Unidad de Tierra Fase B		Unidad de Tierra Fase C	
	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
0	205.7755	59.5766	207.3691	41.9672	210.4511	34.2361
1	202.8070	59.9424	203.1051	46.6019	191.4120	10.2089
2	187.6429	56.7777	201.0349	61.2144	167.5636	7.0530
3	153.1098	64.6667	203.6474	60.7369	131.9486	14.7203
4	119.5294	78.5872	190.4125	40.5601	102.7112	29.2626
5	93.1088	93.1239	152.7974	22.6543	79.2282	41.5373
6	75.2337	102.7195	116.4939	23.6967	60.9555	52.7133
7	59.1216	105.2487	90.0528	29.9373	47.4468	59.3936
8	49.1653	110.0307	69.9073	37.6387	37.0073	63.3342
9	48.7534	110.6496	55.0595	43.5317	28.8163	67.0505
10	51.4325	103.3250	42.0980	49.4060	23.4114	71.5733
11	49.0189	88.8516	32.2932	54.9128	21.5807	73.2910
12	39.4147	77.9071	24.9601	58.5553	20.5291	71.8655
13	28.2965	71.9990	20.1877	60.8831	17.9900	68.1735
14	18.3446	71.0935	16.8009	61.4866	13.9927	66.1143

15	12.1132	69.6198	14.7569	61.6411	11:7528	64.8285
16	6.8498	66.9715	13.2577	59.4917	10.1567	63.2113
17	5.3553	65.6455	11.1077	57.8706	9.1287	60.6168
18	4.8595	63.9517	9.7986	56.7064	7.3088	58.2161
19	4.1053	63.0376	7.5824	56.4548	5.4163	58.6020
20	2.8731	63.3413	5.2544	57.2152	4.0191	59.7086
21	3.8767	63.6728	2.6085	58.9976	2.9410	62.0411
22	2.6859	63.4605	1.3134	60.4001	4.4407	64.1805
23	1.4575	67.7492	-0.4072	61.1928	4.9405	66.4189
24	3.0108	69.2475	-2.1107	62.4668	6.1487	69.9145
25	3.4029	67.9769	-4.5072	64.6318	9.2914	71.0551
26	2.2200	65.4149	-3.5585	67.8905	12.4591	68.7479
27	-0.7398	64.4521	-0.9731	69.0311	9.7842	65.0481
28	-2.0554	64.5513	5.2132	65.8124	3.0625	65.9474
29	0.7713	68.4435	6.3819	55.7589	4.6509	71.2148

DISPARO DEL RELEVADOR : *1.125 Ciclos. Unidades A y C.*
 ZONA DE PROTECCION : *Zona II.*
 DISTANCIA DE LA FALLA : *163.413 Km (101.49%).*

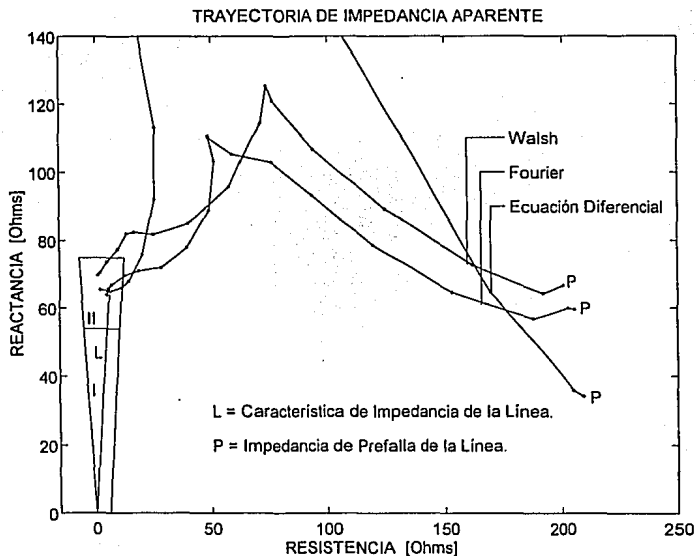


Fig. 6.11 Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase A; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.

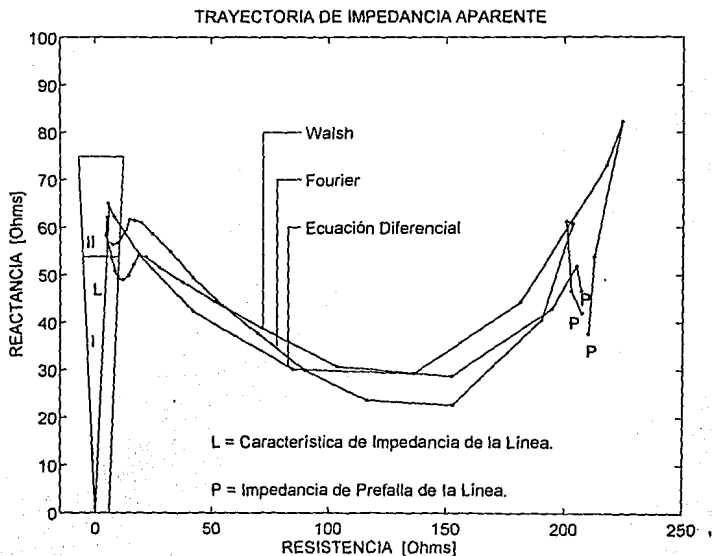


Fig. 6.12 Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase B; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.

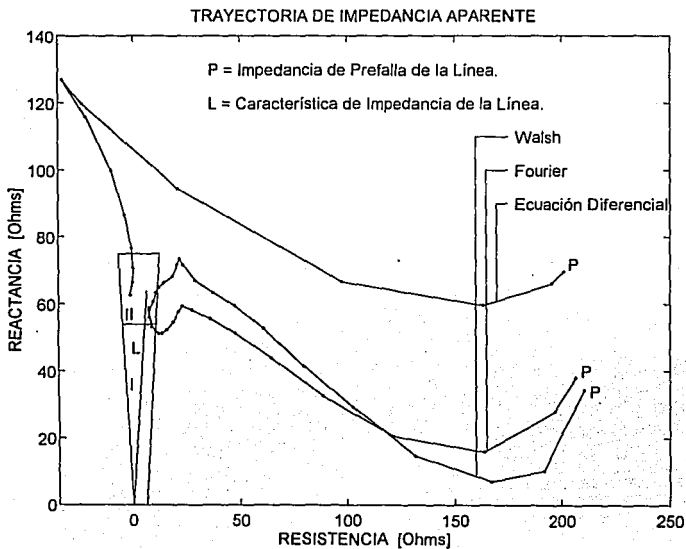


Fig. 6.13 Trayectorias de Impedancia Aparente para la Unidad de Tierra de la Fase C; Obtenidas con los Algoritmos de Ecuación Diferencial, Fourier y Walsh. Muestreo Simultáneo.

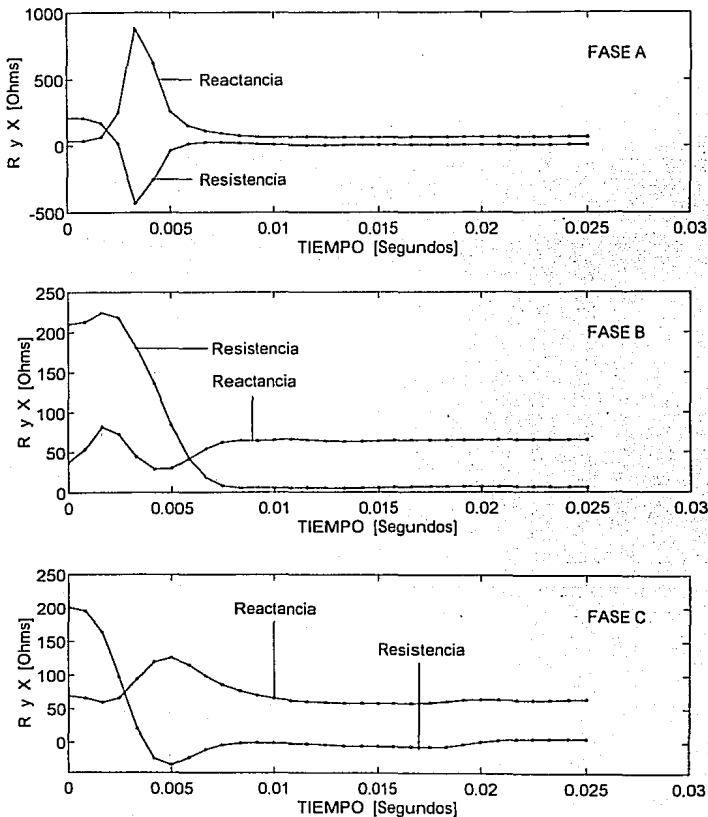


Fig. 6.14 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Ecuación Diferencial con Muestreo Simultáneo.

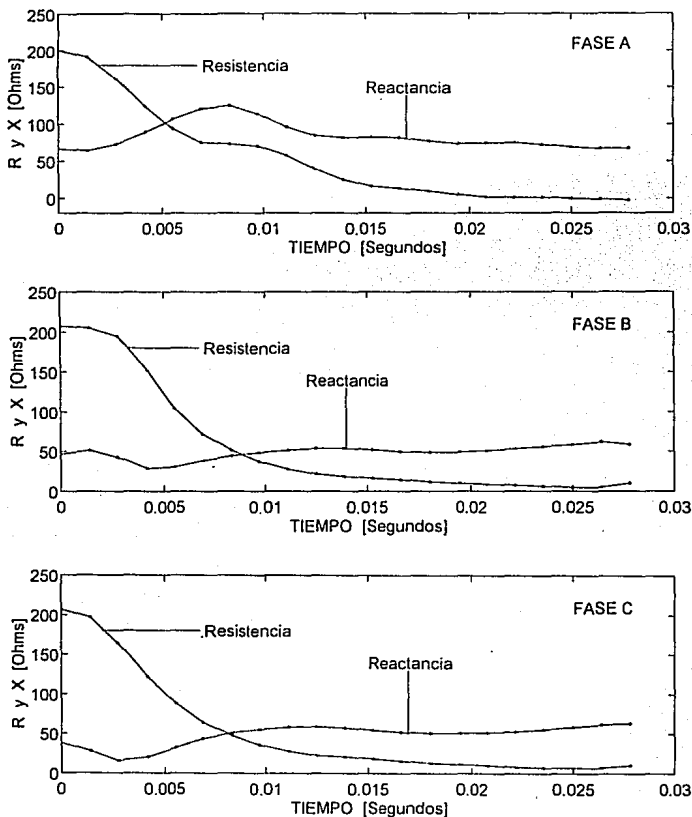


Fig. 6.15 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Fourier con Muestreo Simultáneo.

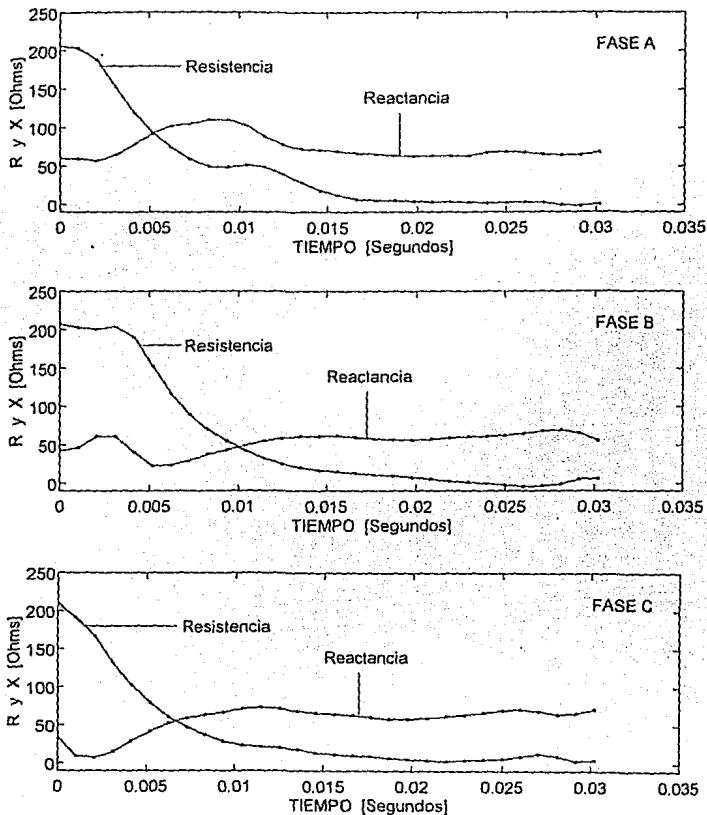


Fig. 6.16 Comportamiento de la Impedancia Aparente para las Tres Unidades de Tierra, Empleando el Algoritmo de Análisis de Walsh con Muestreo Simultáneo.

6.4 RESULTADOS OBTENIDOS.

En las pruebas realizadas en la fase A con **muestreo secuencial**, analizando el algoritmo de ecuación diferencial se puede observar que los primeros valores de impedancia posteriores a la prefalla, se disparan demasiado, aunque posteriormente la trayectoria de los mismos regresa e intersecta en la zona de protección como lo hacen los otros algoritmos. Esto muestra que no tiene un comportamiento como lo presentan los algoritmos de Fourier y Walsh en cuanto a linealidad. El comportamiento que tiene la trayectoria de impedancia en la fase A (fig. 6.5) con el algoritmo de ecuación diferencial, puede deberse a que la ventana de datos que utiliza este algoritmo (4 muestras) es más pequeña que los otros y a que exista un cambio de magnitud muy grande en las primeras muestras de posfalla para esta fase.

En las pruebas de la fase B con el mismo tipo de muestreo (fig. 6.6), se observa un comportamiento mejor en el algoritmo de ecuación diferencial a comparación del que presentó en la fase A. Los otros algoritmos mejoraron su trayectoria.

Analizando la trayectoria presentada en la fase C (fig. 6.7), se puede observar que todos los algoritmos presentan un comportamiento muy similar al presentado en la fase A. La trayectoria del algoritmo de ecuación diferencial tiende a ser la misma pero la magnitud es mucho menor. Los otros algoritmos presentan también un comportamiento mejor.

En cuanto a linealidad, el algoritmo de Fourier es el que mostró un mejor comportamiento que los otros presentando un comportamiento casi lineal para las fases analizadas.

En cuanto a la rapidez de operación de cada algoritmo, se obtuvo lo siguiente:

- ♦ El algoritmo de ecuación diferencial realiza su operación en un tiempo aproximado de 0.012 segundos (0.75 ciclos).
- ♦ El algoritmo de Fourier en un tiempo aproximado de 0.013 segundos (0.833 ciclos).
- ♦ El algoritmo de Walsh en un tiempo aproximado de 0.012 segundos (0.75 ciclos).

Lo que indica que aunque el algoritmo de ecuación diferencial no presenta una trayectoria muy adecuada, es junto con el algoritmo de Walsh, los que se comportan de manera más rápida.

En la fase A con **muestreo simultáneo** (fig. 6.11) se presenta una similitud en cuanto al comportamiento de la trayectoria presentada por el algoritmo de ecuación diferencial empleando muestreo secuencial (fig. 6.5). En cuanto a los otros algoritmos se comportaron los dos con una trayectoria también muy similar entre ambos para las otras fases (fig. 6.12 y 6.13), por lo que no se tiene una determinación de cual fué el de mejor comportamiento de estos últimos en cuanto a linealidad.

Por otro lado, los tiempos de disparo para este tipo de muestreo fueron los siguientes:

- El algoritmo de ecuación diferencial realiza su operación en un tiempo aproximado de 0.010 segundos (0.70 ciclos).
- El algoritmo de Fourier en un tiempo aproximado de 0.022 segundos (1.333 ciclos).
- El algoritmo de Walsh en un tiempo aproximado de 0.018 segundos (1.125 ciclos).

Con este tipo de muestreo, el algoritmo de ecuación diferencial realiza el disparo del relevador en un tiempo más rápido que los otros algoritmos. Se observa también que con este tipo de muestreo, para los algoritmos de Fourier y Walsh, el tiempo de disparo del relevador se incrementó, y para el de ecuación diferencial resultó ser aproximadamente el mismo.

Las pruebas realizadas indican que el algoritmo de ecuación diferencial es el que presenta una mejor precisión en cuanto a la localización de la falla con un error aproximado del ± 1.1 %, el algoritmo de Walsh presenta un error aproximado del ± 1.5 % y por último el algoritmo de Fourier con un porcentaje de error aproximado del ± 1.8 %. La precisión de la localización de la falla se debe al índice de muestreo que emplea cada algoritmo, observándose en los resultados mostrados.

Todas las pruebas mostraron que no se tiene un mismo valor de impedancia de prefalla de la línea para todas las fases ni aún para una sola fase, esto puede

deberse a diversos tipos de errores los cuales se describen en la siguiente sección.

6.5 FUENTES DE ERROR.

Dentro del sistema desarrollado hay que considerar los errores que influyen en los resultados obtenidos, como son:

- ♦ **Error de Resolución:** En este prototipo se emplearon convertidores de 12 bits lo que da una resolución aceptable, pero no para una protección digital de gran exactitud.
- ♦ **Error en la Generación:** En el módulo de generación no se tiene una frecuencia exacta de 60 Hz, sin embargo tiene una tolerancia máxima del 1% lo que permite que se tenga un error muy pequeño.
- ♦ **Error por Multiplexaje:** Se puede apreciar en estas pruebas al comparar los algoritmos, un error en la medición de la resistencia y la reactancia. Este error es debido a que se tiene un multiplexor en la entrada del módulo de adquisición de datos y por lo tanto una recepción de tipo secuencial y no simultánea (sección 4.3.1), por lo que los valores de impedancia no son exactos.
- ♦ **Error de Redondeo:** Este es un error que resulta del análisis de un conjunto parcial de datos en lugar de un conjunto completo o infinito.
- ♦ **Error de Adquisición:** En el módulo de adquisición de datos, al ejecutar el programa, no se tiene siempre un muestreo fijo, es decir, cada vez que se ejecuta el programa, el muestreo de los datos digitales no se realiza nunca en el mismo instante de muestreo.
- ♦ **Error de Monotonicidad:** Este error es porque el convertidor D/A no proporciona una salida de tipo continuo, sino de forma escalonada, de manera que se tiene un error de datos a la salida de cada convertidor en el módulo de generación de transitorios.

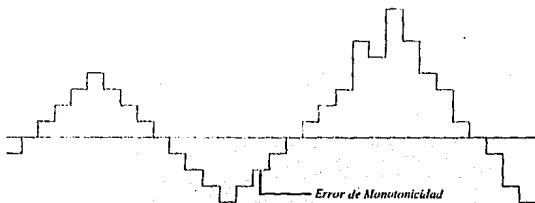


Fig. 6.17 Error de Monotonicidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES GENERALES.

Para las condiciones del sistema establecidas anteriormente (sección 6.1), se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

- ♦ Los equipos de protecciones a base de microprocesadores ofrecen grandes ventajas sobre sus antecesores, ya que son capaces de registrar parámetros antes, durante y después de una falla. Esta información es muy importante para un análisis integral de las fallas, de manera que se pueden establecer criterios definidos en cuanto al comportamiento de los equipos de protecciones ante cada tipo de falla.
- ♦ El lenguaje de programación empleado ayudó de gran manera por su facilidad de aplicación y sencillo entendimiento, además de ser transportable para cualquier computadora personal (no así el ensamblador).
- ♦ Con la arquitectura empleada en este prototipo, se realizó la simulación de una parte del sistema de potencia seleccionado, con las condiciones descritas anteriormente. Realizando la generación de los transitorios para la evaluación del relevador digital. Siendo este tipo de arquitectura aceptable para estas condiciones.
- ♦ Teniendo como base este prototipo de sistema digital de protección de distancia, se pueden desarrollar grandes avances referente a la protección digital de líneas de transmisión, esto debido a la superioridad que presenta sobre los relevadores analógicos.
- ♦ En las pruebas realizadas, se concluye que el algoritmo de ecuación diferencial fué el que actuó de manera más rápida que todos los algoritmos analizados y para los dos tipos de muestreo (secuencial y simultáneo).

- El algoritmo que presentó una mejor trayectoria fué el de Fourier empleando muestreo secuencial y para muestreo simultáneo el de Fourier y Walsh presentaron un comportamiento similar.
- Aunque existen diferencias en cuanto a la trayectoria que presentan los algoritmos y al tiempo de disparo, se concluye que el tiempo de operación de los tres algoritmos es muy aceptable (menos de 0.1 segundos), si consideramos que a los relevadores convencionales les toma de 0.3 a 0.5 segundos realizar el disparo en la segunda zona de protección.
- En la determinación de la distancia, los tres algoritmos mostraron una precisión muy buena respecto a la determinada, tan solo con un pequeño margen de error que fluctúa entre el ± 1.1 y el $\pm 1.8\%$.
- En las pruebas realizadas, el algoritmo de ecuación diferencial presentó una precisión en la localización de la falla de casi el 100%, lo que lo coloca como el algoritmo que tuvo la mejor aproximación en la localización de la falla.
- Con los resultados obtenidos, se comprobó que el tratamiento de los datos y el algoritmo de protección empleado son factores muy importantes en la rapidez y precisión de un relevador digital.

7.2 RECOMENDACIONES.

De acuerdo al tratamiento de datos y a los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda el empleo de circuitos de muestreo y retención para cada canal de entrada analógico. Otra opción es tener para cada canal un convertidor A/D de manera que se digitalice rápida y secuencialmente cada señal retenida, dando una corrección de fase y eliminando errores de retraso originados por el multiplexaje convencional (sección 2.7). Esto implicaría mayor flexibilidad pero con un costo más elevado.
- Se recomienda también que la tarjeta tenga convertidores con resolución de 16 bits para que el relevador cumpla con todas las características funcionales de protección.

- Se recomienda el empleo de un simulador de generación de ondas de falla, esto con la finalidad de evitar todos los errores encontrados en el módulo de generación y simular el sistema en forma más real. En su defecto se requeriría de una tarjeta que tuviese por lo menos siete canales de salidas o convertidores D/A para poder generar cualquier tipo de falla en un sistema de potencia.
- Se recomienda además, que a la salida de los convertidores D/A se empleen circuitos de interpolación lineal, esto con la finalidad de eliminar los escalones de las formas de onda presentados en las salidas. Estos circuitos operan integrando la diferencia entre las muestras sucesivas de salida del convertidor D/A, produciendo una interpolación lineal entre los escalones consecutivos. La forma de onda resultante tiene menos del 1% de distorsión.

7.3 PERSPECTIVAS DE USO FUTURO.

Los resultados obtenidos durante la realización del prototipo fueron satisfactorios de acuerdo con las características planteadas inicialmente. Algunas características se proponen a continuación para un trabajo futuro, otras se desarrollaron solo en parte y son factibles de mejorarse.

- Utilización de computadoras con procesadores más potentes y con mayor velocidad de procesamiento.
- Aplicación del lenguaje C++ y el paquete de software PCLab (SP0141) que esta diseñado para emplearse con las tarjetas DATA TRANSLATION, esto con la finalidad de desarrollar la adquisición de los datos, el procesamiento digital de los mismos, así como los cálculos requeridos por los algoritmos en tiempo real, y realizar las operaciones de disparo para cierre de contactos de manera instantánea.
- Uso de tarjetas de procesamiento digital de señales (DSP), las cuales incluyen un costo reducido, un mejor funcionamiento, facilidad de mantenimiento y flexibilidad de operación.
- Empleo del lenguaje ensamblador para comunicarse directamente con el procesador y llevar a cabo la operación del sistema en tiempo real.

APENDICE A

TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS DT2801-A

A1. SUBSISTEMA ANALOGICO / DIGITAL

ENTRADAS ANALOGICAS.

Número de Entradas Analógicas.	16 de una terminal (SE). 8 diferenciales. (DI).
Escala de Entradas.	Seleccionable con los puentes. Unipolar ó bipolar.
Escala de Entradas Unipolares.	0 a +10 V, 0 a +5 V, 0 a +2.5 V, 0 a +1.25 V, escala completa, dependiendo de el ajuste de la ganancia programable.
Escala de Entradas Bipolares.	± 10 V, ± 5 V, ± 2.5 V, ± 1.25 V, escala completa, dependiendo de el ajuste de la ganancia programable.
Código de Datos de Salida.	Binario directo (unipolar). Binario desplazado (bipolar).
Escala de Ganancia Programable.	1, 2, 4 u 8.
Impedancia de Entrada.	Canal apagado : 100 M Ω , 10 pF. Canal encendido: 100 M Ω , 100 pF.
Corriente Parcial.	± 20 nA.

Voltaje de Entrada en Modo Común.	± 11 V.
Voltaje de Entrada Máximo sin Daño, Encendido.	± 30 V.
Voltaje de Entrada Máximo sin Daño, Apagado.	± 20 V.
Amplificador de Entrada de Ruido.	10 mV. rms (donde la ganancia es más grande que 1, la entrada es multiplicada por la ganancia). \pm LSB (Bipolar, ganancia = 8)
Error de Voltaje de Entrada Canal a Canal.	± 10 mV.
EXACTITUD.	
Resolución.	12 bits.
No Linearidad Diferencial.	Menor que $\pm 1/2$ LSB.
Error de Cuantización Inherente.	Menor que $\pm 1/2$ LSB.
Exactitud del Sistema.	Dentro de $\pm 0.5\%$ FSR.
Canal.	-80 dB a 1 KHz.
Muestreo y Retención.	0.1 mV / seg.
Error de Ganancia.	Ajustable a 0.
Error Cero.	Ajustable a 0.
RENDIMIENTO DINAMICO.	
Tiempo de Adquisición del Canal	15 msec.

dentro de 1/2 LSB.

Tiempo de Conversión A/D.	25 mseg.
Velocidad de Procesamiento a la Memoria del Sistema (Máxima).	27,500 muestras por seg.
Apertura de Muestreo y Retención.	10 nseg.
Atenuación del Muestreo y Retención.	80 dB a 1 Khz.

CARACTERISTICAS TERMICAS

Velocidad Zero A/D.	± 20 mV / °C (unipolar).
Velocidad del Amplificador.	± 25 mV / °C.

A2. SUBSISTEMA DIGITAL / ANALOGICO.

SALIDAS ANALOGICAS.

Número de Canales.	2
Escala de Salidas.	0 a +10 V (unipolar). 0 a +5 V (unipolar). ± 10 V, ± 5 V, ± 2.5 V (bipolar).
Corriente de Salida.	5 mA.
Impedancia de la Fuente.	0.1 Ω máx.

EXACTITUD.

Resolución.	12 bits.
-------------	----------

No Linearidad Diferencial.	Menor que $\pm 1/2$ LSB.
Error de Cuantización Inherente.	Menor que $\pm 1/2$ LSB.
Error de Ganancia.	Ajustable a 0.

RENDIMIENTO DINAMICO.

Tiempo de Ajuste a 1/2 LSB.	50 μ seg.
-----------------------------	---------------

A3. DISPARO

Tipo de Entrada.	Disparador Schmitt.
Familia Lógica.	LSTTL.
Carga Lógica.	Presenta 1 carga LSTTL
Voltaje de Entrada Alto.	2 V. mínimo.
Voltaje de Entrada Bajo.	0.6 V. máximo.
Corriente de Entrada Alto.	0.1 mA a 7.0 V. máximo. 0.02 mA a 2.7 V. mínimo.
Corriente de Entrada Bajo.	0.4 mA máximo.
Mínimo Ancho de Pulso	
Pulso Alto.	200 nseg.
Pulso Bajo.	200 nseg.

A4. RELOJ INTERNO.

Frecuencia Base.	800 kHz ± 0.015 %
------------------	-----------------------

A5. CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFACE.

Bus Compatible.	Bus de I/O de la IBM PC.
Tipo de Interface.	Mapeo de I/O con direccionamiento de 10 bits.
Número de Localidades Ocupadas.	Reservado a 2 bytes.
Direccionamiento Base Asignado de Fabrica.	2EC (Hexadecimal).

A6. REQUERIMIENTOS DE ENERGIA.

+ 5 V.	±5%
--------	-----

A7. ENTORNO FISICO DE LA TARJETA

Dimensiones.	11.4 x 34.3 x 2.5 cm.
Peso.	411 gr.
Temperatura de Operación.	0 a 50 °C.
Humedad.	90 %.

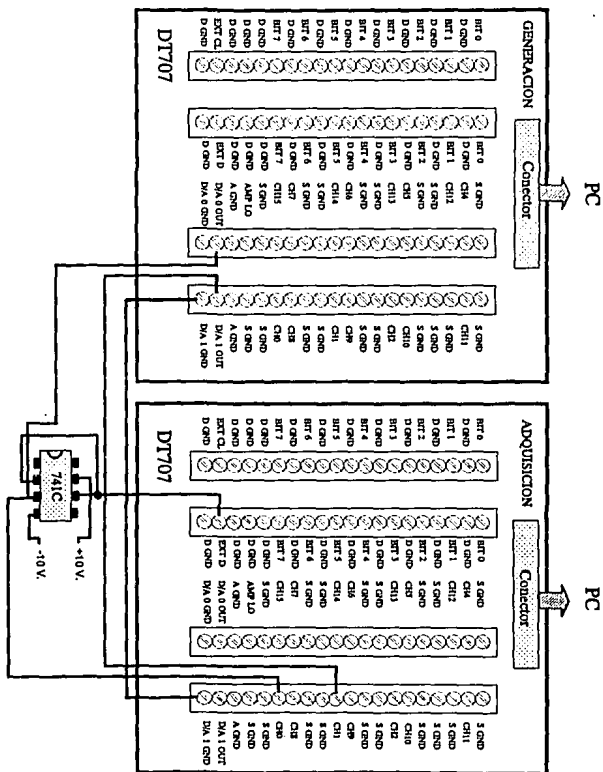
APENDICE B

TABLILLA DE CONEXIONES DT707

B1. ESPECIFICACIONES GENERALES

Dimensiones.	13.21 x 22.23 x 2.22 cm.
Peso.	355 gr.
Bornes	80 bornes dividido en 4 secciones de 20 bornes cada uno.
Resistencias	250 Ω (0 a 20 mA).
Tolerancia de las Resistencias	± 0.02 %
Disipación de Potencia	1/4 watt.
Coefficiente de Temperatura de las Resistencias	± 15 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.

B2. DIAGRAMA DE CONEXIONES



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. "Protective Relays Application Guide",(1985). General Electric Company Measurements, England.
2. "The Art of Protective Relaying", (1964). The General Electric Co. Switchgear Department, Philadelphia, Pa., pp. 3-31.
3. Altuve Ferrer H. (1993, Noviembre). "Introducción a los Relevadores y Sistemas Digitales de Protección", Curso Tutorial, Monterrey N. L.
4. J. V. Ginori., H. J. Altuve Ferrer (1993, Noviembre), "Efecto de las Funciones de Ponderación de Ventana sobre los Filtros Digitales para Relevadores de Distancia", Segundo Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, Monterrey N. L., pp. 215-221.
5. W. J. Smolinski. (1979), "An Accurate Digital Low - Pass Filter for Transmission Line Protection", Electric Power Systems Research, Vol. 2, pp. 253-259.
6. G. R. Slemon., D.T. Robertson (1968)."High Speed Protection of Power Systems Based on Improved Power System Models", CIGRE, Paris.
7. W. Horton (1975). "The Use of Walsh Functions for High-Speed Digital Relaying", IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco Cal., Paper No. A75 582-7, pp. 1-9.
8. B. Jeyasurya., W. J. Smolinski (1983). "Design and Testing of a Microprocessor Based Distance Relay", IEEE Summer Meeting, Los Angeles, Cal., pp. 1104-1110.
9. "Design Motivations for Multiple Processor Microcomputer Systems", Computer Design, Marzo de 1978.
10. "User Manual for DT2801 SERIES" (1988). Data Translation, Inc. Marlboro, MA. Eighth Edition.

11. Al-Fuhard A. S. and Said M. M. (1986). "A Method for the Computation of Fault Transients in Transmission Lines", IEEE Summer Meeting, Mexico City, Paper No. 86 SM418-8.
12. Estrada García E. (1992). "Protección Digital de Líneas de Transmisión", Tesis de Maestría, DEPE UNAM, México.
13. W. D. Stanley (1975). "Digital Signal Processing", Reston Publishing Company, Inc., Virginia.
14. Enriquez Harper G. (1993, Julio). "Bases para Evaluar la Confiabilidad en las Líneas de Transmisión de la CFE", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., Tomo 4, pp. 355-363.
15. Altuve Ferrer H. (1990, Julio). Parte I: "Estudios por Simulación Digital del Sistema y su Protección", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., Tomo 4, pp. 7-12.
16. Altuve Ferrer H. (1990, Julio). Parte II: "Sistemas y Relevadores de Protección", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., Tomo 4, pp. 13-19.
17. Vázquez M., O. L. Chacón M. (1991). "Modelo Generalizado de la Lógica de Operación de Protecciones en un Sistema Eléctrico de Potencia", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., Tomo 4, pp. 111-119.
18. Charles A. Gross (1982). "Power System Analysis", Ed. John Wiley & Sons.
19. R. Mason (1984). "El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores", Ed. CECSA
20. J. Damberg, S. S. Venkata. "Specification of Computer - Aided Design of Transmission Protection Systems", EPRI, pp. 7.1 - 7.14
21. Ronald V. T. (1993). "Coordinación, Ajuste y Simulación de Relevadores de Distancia", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., pp. 56-59.

22. Martínez A. M. (1991). "Uso de Herramientas Digitales para Análisis de Fallas en Sistemas de Potencia", IEEE Sección México, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco Gro., pp. 61-65.
23. Breingan, W. D.(1979). "The Laboratory Investigation of a Digital System for the Protective of Transmission Line", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 350-368.
24. W. A. Lewis ., L. S. Tippet (1947), "Fundamental Basis for Distance Relaying on a 3-Phase System", AIEE Trans., Vol. 66, pp. 694-708.
25. W. J. Smolinski. (1979), "Digital Distance Protection of Transmission Lines", Electric Power Systems Research, Vol. 2, pp. 261-267.
26. S. Sachdev (1987). "Microprocessor Relays and Protection Systems", IEEE Power Engineering Society, Tutorial Course, University of Saskatchewan Canada.
27. M. G. Hunchuk (1975). "Performance of Analog to Digital Converters Used in Computer Relaying", Winter Meeting, New York, N.Y., Paper No. A76 154-5, pp. 1-7.
28. E. O. Schweitzer. "Unified Protection, Monitoring, and Control of Overhead Transmission Lines Achieves Performance and Economy", Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, WA.
29. Ronald J. Tocci. "Sistemas Digitales, Principios y Aplicaciones", Ed. Prentice Hall, 5a. Edición.
30. L. Joyanes A.(1992). "Programación Basic para Microcomputadoras", Tercera Edición, Ed. Mc Graw Hill.
31. G. Gangadharan (1990, October). "Microprocessor Based Three Step Quadrilateral Distance Relay for the Protection Of EHV / UHV Transmission Lines", International Power Meeting, India New Delhi., pp. 91- 97.
32. E. A. Guillemin (1963). "Theory of Linear Physical Systems", Wiley N.Y., pp. 411-415.

- 33.M. Kezunovic (1989). "DYNA - Test Simulator : Protective Relaying Teaching Tool", IEEE/PES Winter Meeting, New York N.Y., Paper No. 89 WM042-3, pp.1298-1305.
- 34.P. Bomard (1987). "MORGAT : A Data Processing Program for Testing Transmission Line Protective Relays", IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco Cal., Paper No. 87 SM624-0, pp. 1419-1426.
- 35.P. G. McLaren (1991). "A Real Time Digital Simulator for Testing Relays", IEEE/PES Summer Meeting, San Diego Cal., Paper No. 91 SM319-4, pp. 207-213.